

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Câmpus de Rio Claro

Eduardo Patrício dos Santos

**COMPORTAMENTO DAS CURVAS DE SATURAÇÃO DA ÁGUA E LNAPL EM
SOLO DA FORMAÇÃO RIO CLARO**

**Dissertação de Mestrado apresentada
ao Instituto de Geociências e Ciências
Exatas do Campus de Rio Claro, da
Universidade Estadual Paulista Júlio
de Mesquita Filho, como parte dos
requisitos para obtenção do título de
Mestre em Geociências e Meio
Ambiente**

Orientador: Prof. Dr. Chang Hung Kiang

Rio Claro (SP)

2014

551.49 Santos, Eduardo Patrício dos
S237c Comportamento das curvas de saturação da água e LNAPL
em solo da formação Rio Claro / Eduardo Patrício dos Santos.
- Rio Claro, 2014
136 f. : il., figs., gráfs., tabs., fots.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista,
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Orientador: Chang Hung Kiang

1. Águas subterrâneas. 2. Poros bimodais. 3. Solos
tropicais. 4. Hidrogeologia. 5. Remediação. 6. Meio ambiente.
I. Título.

Eduardo Patrício dos Santos

**COMPORTAMENTO DAS CURVAS DE SATURAÇÃO DA ÁGUA E LNAPL
EM SOLO DA FORMAÇÃO RIO CLARO**

**Dissertação de Mestrado
apresentada ao Instituto de
Geociências e Ciências Exatas
do Campus de Rio Claro, da
Universidade Estadual Paulista
Júlio de Mesquita Filho, como
parte dos requisitos para
obtenção do título de Mestre em
Geociências e Meio Ambiente.**

Comissão Examinadora

**Prof. Dr. Chang Hung Kiang
IGCE/UNESP/Rio Claro (SP)**

**Prof. Dr. Everton de Oliveira
HIDROPLAN – Hidrogeologia e Planejamento Ambiental Ltda/Cotia (SP)**

**Dr. Miguel Angel Alfaro Soto
FUNDUNESP/São Paulo (SP)**

Resultado: Aprovado.

Rio Claro, SP, 16 de abril de 2014.

“Tudo posso naquele que me fortalece”

Filipenses 4:13

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Senhor, Pai de infinita bondade que me conduziu até aqui. Caminho muitas vezes incompreendido por minha pequenez, mas aceito com a certeza de Sua presença em cada momento de minha vida.

Agradeço ao Senhor pela paciência, companheirismo e carinho que encontrei em minha esposa, que me fortaleceram em todos os momentos.

Agradeço ao Senhor por meus filhos pois mesmo que não saibam, me motivaram em todo o percurso.

Agradeço ao Senhor pela força de meus pais, que sempre incentivaram meus estudos, apesar das inúmeras dificuldades.

Agradeço ao Senhor pela sabedoria de meu orientador, Prof. Dr. Chang Hung Kiang, que soube ser assertivo em todos os momentos.

Agradeço ao Senhor pela amizade, dedicação, paciência e ensinamentos de meu amigo Miguel.

Agradeço ao Senhor pela ajuda e amizade de meu amigo Elias Isler, que por muitos momentos remou no mesmo barco que eu.

Agradeço ao Senhor pela compreensão e amizade dispensada por minha gerente e amiga, Sílvia Maria Ferreira.

Agradeço ao Senhor por colocar pessoas maravilhosas em meu caminho. Pessoas estas que me ajudaram, cada qual a sua maneira, a concretizar este sonho: Patrícia, Lélia, Cristiane, Thelma, Davi, Rachila, Mariane, Celine, Izete, Carl, Eliana, Luciana, Magali, Cris, Joseli, Juliana, Bianca, Amanda, Braga, César, Andresa, Didier, Everton, Márcia, Filipe, Thomás, Dani, Marco, Teramoto, Paco, Diego, Rosângela e Márcia Sabbag.

Sabendo que o sacrifício de alguém nunca é solitário, e que as conexões firmadas não se desfazem, agradeço a DEUS por cada um de vocês.

DEUS os abençoe!

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
2. OBJETIVOS	14
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
3.1. Conceitos Básicos	15
3.2. Curvas de Saturação no Solo	27
4. MÉTODOS EXPERIMENTAIS E ANALÍTICOS	40
4.1. Caracterização da Área de Estudo	40
4.2. Trabalhos de Campo	41
4.2.1. Coleta de Amostras Deformadas e Indeformadas	42
4.3. Ensaaios Laboratoriais	44
4.3.1. Solo	44
4.3.1.1. Granulometria, Densidade do solo e Densidade dos grãos do solo	44
4.3.1.2. Difração de Raios-X	45
4.3.2. LNAPL	46
4.3.2.1. Tensão Superficial e Tensão Interfacial	47
4.4. Equipamento para determinação de curva de saturação ar/água, ar/óleo e óleo/água	48
4.4.1. Preparação das Amostras	48
4.4.2. Curva de saturação – Sistema Ar-Água	49
4.4.2.1. Método do Funil de Placa Porosa – Sistema Ar-Água	50
4.4.2.2. Método da Câmara de Pressão – Câmara de Richards	53
4.4.3. Curva de saturação – Sistema Ar-Querosene	56
4.4.3.1. Método do Funil de Placa Porosa – Sistema Ar-Querosene	56
4.4.3.2. Tratamento das Placas Cerâmicas para testes com LNAPL	58
4.4.4. Curva de saturação – Sistema Querosene-Água	59
4.4.4.1. Método do Funil de Placa Porosa – Sistema Querosene-Água	59
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	64
5.1. Distribuição Granulométrica e Densidade dos Grãos do Solo	64
5.2. Difração de Raios-X	66
5.3. Tensão Superficial e Tensão Interfacial	67
5.4. Curva de Saturação – Sistema Ar-Água	69
5.4.1. Método do Funil de Placa Porosa	69
5.4.2. Método da Câmara de Pressão – Câmara de Richards	70

5.4.3.	Ajustes Unimodais e Bimodais para curvas provenientes dos testes do Funil de Placa Porosa – Sistema Ar-Água	72
5.5.	Curva de Saturação – Sistema Ar-Querosene.....	75
5.5.1.	Ajustes Unimodais e Bimodais para curvas provenientes dos testes do Funil de Placa Porosa – Sistema Ar-Querosene	77
5.5.2.	Obtenção de curvas de saturação Ar-Querosene por métodos indiretos.....	81
5.6.	Curva de saturação – Sistema Querosene-Água	86
6.	CONCLUSÕES	87
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	89
8.	ANEXOS.....	99
8.1.	Medidas realizadas durante os ensaios – Sistema Água-Ar – Método do Funil de Placa Porosa	100
8.2.	Medidas realizadas durante os ensaios – Sistema Água-Ar – Método da Câmara de Pressão – Câmara de Richards	114
8.3.	Medidas realizadas durante os ensaios – Sistema Querosene- Ar – Método do Funil de Placa Porosa	120

INDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Tensões interfaciais em um sistema trifásico.....	19
Figura 2 – Relação entre molhabilidade e ângulo de contato (Modificado de Anderson, 1986).....	22
Figura 3 – Presença de água capilar e adsorvida em partículas de solo (Modificado de HILLEL, 2004)	25
Figura 4 - Pressão interna em superfícies plana,	26
Figura 5 - Curva de saturação para solos arenosos, siltosos e argilosos (Adaptado de FREDLUND; XING, 1994).....	28
Figura 6 – Elementos presentes em uma curva de saturação (Adaptado de FREDLUND; XING, 1994)	28
Figura 7 – Curva de Saturação para Areia utilizando as funções de Brooks-Corey, van Genuchten e Fredlund-Xing (Adaptado de BURGER e SHACKELFORD, 2001)	31
Figura 8 - Curva de Saturação para Silte utilizando as funções de Brooks-Corey, van Genuchten e Fredlund-Xing (Adaptado de BURGER e SHACKELFORD, 2001)	31
Figura 9 - Curva de Saturação para Silte utilizando as funções de Brooks-Corey, van Genuchten e Fredlund-Xing (Adaptado de BURGER e SHACKELFORD, 2001)	32
Figura 10 – Esquema do Funil de Placa Porosa (LIBARDI, 2010).	36
Figura 11 – Localização da área de coleta das amostras de solo.	40
Figura 12 – Determinação da Tensão Interfacial (a) Determinação da tensão interfacial Querosene (SUDAN) e Água; (b) Determinação da tensão interfacial Querosene e Água.....	48
Figura 13 – Retirada de amostra indeformada e coleta de material para determinação de umidade do solo.	49
Figura 14 – Saturação da amostra de solo com água	50
Figura 15 – Esquema da câmara de pressão utilizada no teste do funil de placa porosa.	50
Figura 16- Aparato utilizado no teste das Placas de Sucção	52
Figura 17– Momentos de expulsão de água e de rebote	53
Figura 18 - Esquema da câmara de pressão utilizada.	54
Figura 19– Aparato utilizado no teste com as Câmaras de Pressão de Richards	54
Figura 20 – Detalhe da primeira versão do equipamento para o teste do Sistema Água-Querosene..	61
Figura 21 - Detalhe da segunda versão do equipamento para o teste do Sistema Água-Querosene e presença de bolha de ar.	62
Figura 22 - Detalhe do equipamento para o teste do Sistema Água-Querosene, utilizando sistema de pressão controlada.	63
Figura 23 – Difratoograma da amostra normal	66
Figura 24 – Difratoograma da amostra preparada com etilenoglicol	67
Figura 25 – Difratoograma da amostra aquecida a 550°C	67

INDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Densidade de diferentes substâncias (modificado de VALLERO, 2004)	16
Tabela 2 – Tensão superficial de diversos fluidos a 20°C (modificado de VALLERO, 2004).....	20
Tabela 5 – Característica média dos anéis de alumínio.....	45
Tabela 6 – Características físico-químicas do QAV-1	46
Tabela 9 – Dados para Classificação Granulométrica – Amostra G-01	64
Tabela 10 – Dados para Classificação Granulométrica – Amostra G-02	65
Tabela 11 – Dados para Classificação Granulométrica – Amostra G-03	65
Tabela 12 – Tensão superficial e interfacial (Querosene e Água)	68
Tabela 13 – Pressão Capilar versus Umidade Volumétrica.....	69
Tabela 14 – Pressão Capilar versus Umidade Volumétrica.....	70
Tabela 15 – Parâmetros de ajuste de curvas – Unimodal e Bimodal.....	73
Tabela 16 – Pressão Capilar versus Umidade Volumétrica (Ar-Querosene).....	75
Tabela 17 – Parâmetros de ajuste de curvas – Unimodal e Bimodal.....	77
Tabela 18 – Parâmetros de obtenção das curvas pelo método indireto – Lenhard e Parker.....	81
Tabela 19 - Parâmetros de obtenção das curvas pelo método indireto – Charbeneau.....	82
Tabela 20 – Comparativo entre as médias (θ_0)	85

INDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Variação da Tensão Superficial da água a diferentes temperaturas	20
Gráfico 2 – Distribuição das dimensões dos grãos que passam – Amostra G-01	64
Gráfico 3 – Distribuição das dimensões dos grãos que passam – Amostra G-02	65
Gráfico 4 – Distribuição das dimensões dos grãos que passam – Amostra G-03	66
Gráfico 5 – Pressão Capilar versus Umidade Volumétrica – relação entre amostras	70
Gráfico 6 – Pressão Capilar versus Umidade Volumétrica – relação entre amostras	71
Gráfico 7 – Resultados provenientes dos testes de Funil e Câmara de Richards	72
Gráfico 8 – Ajuste Unimodal e Bimodal – Amostra III	73
Gráfico 9- Ajuste Unimodal e Bimodal – Amostra VII	74
Gráfico 10 – Ajuste Unimodal e Bimodal – Amostra X	74
Gráfico 11 – Ajuste Unimodal e Bimodal – Amostra XI	74
Gráfico 12 – Pressão Capilar versus Umidade Volumétrica – relação entre amostras – Sistema Ar-Querosene	76
Gráfico 13 – Comparativo entre os resultados medidos nos sistemas Ar-Água e Ar-Querosene	76
Gráfico 14 – Ajuste Unimodal e Bimodal – Amostra XIV	78
Gráfico 15 – Ajuste Unimodal e Bimodal – Amostra XXV	78
Gráfico 16 – Ajuste Unimodal e Bimodal – Amostra XXVI	79
Gráfico 17 – Ajuste Unimodal e Bimodal – Amostra XXVII	79
Gráfico 18 – Comparativo entre Dados Experimentais (Ar-Óleo) e método indireto (Ar-Água)	82
Gráfico 19 – Comparação entre métodos indiretos e diretos – Amostra III	83
Gráfico 20 – Comparação entre métodos indiretos e diretos – Amostra VII	83
Gráfico 21 – Comparação entre métodos indiretos e diretos – Amostra X	83
Gráfico 22 – Comparação entre métodos indiretos e diretos – Amostra XI	84
Gráfico 23 – Médias obtidas para o sistema direto e para o sistema indireto (A-O)	85

INDICE DE FOTOS

Foto 1– Procedimento para a coleta do bloco de amostra indeformada	43
Foto 2 – Localização do ponto de coleta das amostras indeformadas.	43

RESUMO

Ensaio para obtenção de curvas de saturação para sistemas Água-Ar e Ar-Querosene foram realizados em amostras de solo tropicais, coletadas em afloramento típico da Formação Rio Claro.

A determinação das curvas de saturação por experimentos diretos foi conduzida no Laboratório de Remediação de Áreas Impactadas por Hidrocarbonetos (RAIH) da UNESP de Rio Claro e foram obtidas pelos métodos do funil de placa porosa e da câmara de Richards, sendo este último somente aplicado ao sistema Ar-Água. Nestes ensaios foram estabelecidos critérios e melhorias nos procedimentos analíticos realizados até então, principalmente no caso da determinação da curva de saturação para o sistema Ar-Querosene.

Os resultados obtidos em laboratório foram inseridos em gráficos relacionando a pressão aplicada e a saturação volumétrica do meio poroso. A partir da obtenção destas curvas, os dados experimentais foram ajustados a modelos unimodais (van Genuchten) e bimodais (Durner). Os melhores ajustes obtidos para cada amostra indicaram comportamento bimodal na distribuição do tamanho dos poros para o solo estudado.

Modelos teóricos também foram empregados para obtenção indireta das curvas de saturação do sistema Ar-Querosene a partir dos dados experimentais obtidos para o sistema Ar-Água. Estes modelos foram desenvolvidos originalmente para o cálculo da estimativa de recuperação de LNAPL no meio poroso, em áreas que passam por processos de remediação.

Em relação aos dados obtidos de maneira indireta para o sistema Ar-Querosene, estes indicam que os modelos propostos por Lenhard e Parker (1987) e Charbeneau (API, 2007) apresentam diferença nos resultados das curvas de saturação quando comparados entre si e entre os dados obtidos experimentalmente para o sistema Ar-Querosene. Considerando-se que o volume de LNAPL recuperável pode ser calculado pela área determinada abaixo da curva de saturação, e que os dados experimentais diferenciam-se dos dados obtidos indiretamente, conclui-se que estes modelos indiretos podem não traduzir a realidade, proporcionando valores irreais de prazo e custos nas estimativas de remediação.

ABSTRACT

Experiments for obtaining saturation curves for the water-air systems and Air-Kerosene were performed in tropical soil samples collected in typical outcrop of the Rio Claro Formation.

The determination of saturation curves through direct experiments was conducted in the Laboratory of Remediation Areas Impacted by Oil (RAIH), UNESP, Rio Claro and were obtained using the porous plate funnel method and the Richards chambers method, the latter was only applied to the Air-Water System. In these experiments it was established criteria and new improvements in the analytical procedures described in literature, particularly on the determination of the saturation curve for the Air-Kerosene system.

The results obtained in the laboratory were plotted into graphs relating the applied pressure to the volumetric saturation of the porous medium and were adjusted to the unimodal model (van Genuchten) and bimodal model (Durner). The best fit obtained for each sample indicated bimodal behavior for the distribution of pore size of the studied soil.

Theoretical models proposed by Lenhard and Parker (1987) and Charbeneau (API, 2007) were also used to indirectly estimate the saturation curves of the Air-Kerosene system from the experimental data obtained for the Air-Water system. These models were originally developed for the calculation of the estimate of the recovery LNAPL porous in remediation processes. They indicate that the models show differences in the results of the saturation curves when compared between themselves and also for the data obtained experimentally for the air kerosene system. Since the amount of recoverable LNAPL can be estimated by the area underneath the saturation curve and considering that the experimental data are differ from the data obtained indirectly, we concluded that these indirect theoretical models may not correspond to the actual curves, providing unrealistic estimates of time and costs for the remediation.

1. INTRODUÇÃO

O número de casos de áreas contaminadas registradas no Estado de São Paulo teve um crescente aumento desde que foram implementados, pela CETESB (Companhia Ambiental do Estado de São Paulo), procedimentos de investigação de solo e água subterrânea para o licenciamento ambiental em algumas atividades do setor produtivo.

Segundo o cadastro de áreas contaminadas da CETESB, revisado em 2010, o número de registro de áreas contaminadas subiu de 255, em maio de 2002, para 3.675 em dezembro de 2010.

Deste total, cerca de 80% dos registros fazem parte do universo dominado pelo comércio e estocagem de produtos derivados de petróleo que em sua maioria, são compostos por postos de serviços e retalhistas de combustíveis.

Dentro do grupo de contaminantes presentes nos registros de áreas contaminadas, os combustíveis líquidos são os que predominam, representando cerca de 2.500 casos. E quando esse tipo de contaminante, produto em fase livre móvel, atinge o meio subterrâneo, é denominado de LNAPL (*Light Non-Aqueous Phase Liquids*).

A caracterização e recuperação destes LNAPLs em meio poroso tem sido objeto de estudos que procuram compreender a dinâmica e os processos envolvidos, que podem aumentar ou diminuir o volume de produto recuperado, otimizando recursos humanos, técnicos e financeiros.

A variação do nível d'água subterrânea ao longo de alternados ciclos hidrogeológicos, pode potencializar as limitações técnicas envolvidas na remediação destas áreas, uma vez que podem ocasionar o aprisionamento de LNAPL em poros, como discutido por Wilson (1990).

Há uma variedade de estudos e modelos relacionados ao comportamento e distribuição de contaminantes em subsuperfície, como os realizados por Charbeneau (1989, 1992, 1995, 2000, 2003, 2006, 2007), Wilson (1988, 1990), Lenhard e Parker (1987, 1988, 1990). Mas embora haja grande volume de estudos realizados em outros países, principalmente de clima temperado, utilizando materiais geológicos que passaram por inúmeros processos

intempéricos específicos, o que se encontra relacionado a estudos envolvendo materiais geológicos brasileiros, de clima tropical, é um número bem menor de trabalhos.

O presente projeto avalia o comportamento das curvas de saturação de água e de LNAPL em solo tropical, ou seja, da Formação Rio Claro, no município de Rio Claro, Estado de São Paulo, bem como discuti sua aplicação nos modelos de distribuição e recuperação de fase livre, encontrados na literatura especializada (CHARBENEAU, 2003, 2007).

O combustível escolhido foi o Querosene de Aviação (QAV-1) que é equivalente ao JET-A-1, padrão utilizado internacionalmente para o transporte aéreo, ou seja, a utilização deste combustível teve como peso sua universalidade.

O emprego do estudo das curvas de saturação implica no conhecimento da estimativa de produto (LNAPL) disponível para a remoção, ou seja, pode direcionar toda a estratégia de remediação de uma área contendo fase livre.

2. OBJETIVOS

O principal objetivo deste projeto está na avaliação do comportamento das curvas de saturação de água e Querosene de Aviação (QAV-1), um LNAPL, em solos típicos de zonas de clima tropical, ou seja, que sofreram atuação de processos geológico e/ou pedológicos típicos das regiões tropicais úmidas, e que muitas vezes podem apresentar características como a multimodalidade da distribuição do tamanho dos poros (SOTO e CHANG, 2013) determinantes para o comportamento do fluxo de fluidos. Assim, como representante deste tipo de solo, foi escolhido o da Formação Rio Claro, no município de Rio Claro, Estado de São Paulo.

Secundariamente será discutida a aplicação das curvas de saturação, tanto em água como em Querosene, em modelos destinados à determinação de fluxo multifásico, tal como a distribuição do LNAPL em meio poroso, utilizado em alguns casos para estimativa de volumes e tempo de recuperação de contaminantes em fase livre por métodos convencionais de remediação, modelos estes amplamente disponibilizados em literatura, como por exemplo, o proposto em API (2007).

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Conceitos Básicos

Freeze e Cherry (1979) descrevem que há três propriedades físicas básicas dos fluidos que devem ser conhecidas, para a compreensão da hidráulica no meio poroso saturado: densidade, viscosidade e compressibilidade. Para o meio não saturado acrescenta-se a tensão superficial e interfacial (BEAR, 1972, 1979).

A **densidade** de um fluido é definida como massa por unidade de volume, sendo que no sistema internacional de unidades (SI) é dada em kg/m^3 .

É representada pela relação:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (\text{Equação 1})$$

Onde:

ρ – densidade (kg/m^3);

m – massa (kg);

V – Volume (m^3).

A densidade de um fluido sofre diretamente a influência da temperatura do meio em que está inserido, sendo que diminui seu valor das menores para as maiores temperaturas. A **Tabela 1** apresenta a diferença de densidade de diferentes compostos a uma mesma temperatura.

A **Tabela 1** descreve a densidade de diversos compostos:

Tabela 1 – Densidade de diferentes substâncias (modificado de VALLERO, 2004)	
Fluido	Densidade a 20 °C (kg/m ³)
Ar a 21°C	1,00x10 ⁻⁶
Amônia	6,02x10 ⁻⁴
Etanol	7,90x10 ⁻⁴
Acetona	7,91x10 ⁻⁴
Gasolina	7,00x10 ⁻⁴
Querosene	8,20x10 ⁻⁴
Benzeno	8,79x10 ⁻⁴
Água Pura	1,00x10 ⁻⁶
Água do Mar	1,03x10 ⁻⁶
Clorofórmio	1,49x10 ⁻⁶
Tetraclorometano	1,60x10 ⁻⁶
Chumbo	1,13x10 ⁻²
Mercúrio	1,36x10 ⁻²
QAV-1	8,04x10 ⁻²

No caso dos contaminantes orgânicos presentes em subsuperfície, como os LNAPL (menos densos que a água) e os DNAPL – *dense non-aqueous phase liquids* (mais densos que a água), a densidade de cada um acarretará em comportamentos totalmente distintos no meio físico saturado, com formas de estudo e tratamento diferentes.

A **viscosidade** de um fluido é à propriedade que permite a este fluido resistir ao movimento relativo e a deformação de cisalhamento durante o fluxo. Quanto mais viscoso for o fluido, maior será a tensão de cisalhamento em qualquer gradiente de velocidade (FREEZE; CHERRY, 1979).

Um fluido é denominado Newtoniano quando apresentar viscosidade constante em quaisquer taxas de cisalhamento, a uma temperatura e pressão constantes. A água e boa parte dos solventes orgânicos são considerados fluidos Newtonianos (VALLERO, 2004).

De acordo com a lei da viscosidade de Newton, tem-se que:

$$\tau = \frac{F}{A} = \eta \frac{dv}{dy} \quad (\text{Equação 2})$$

Onde:

τ – cisalhamento (Pa);

F – força tangencial (N);

A – área (m²);

η – coeficiente de viscosidade dinâmica (Pa.s);

dv/dy – gradiente de velocidade.

A relação entre a viscosidade dinâmica de um fluido e sua densidade é chamada de viscosidade cinemática:

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad (\text{Equação 3})$$

Onde:

ν – viscosidade cinemática (m²/s);

η – viscosidade dinâmica (Pa.s);

ρ – densidade do fluido (kg/m³).

Líquidos com baixa viscosidade fluem mais facilmente e são ditos que possuem maior fluidez. Segundo Hillel (2004), a viscosidade da água diminui em mais de 2 % a cada 1°C aumentado, portanto diminui mais de 50% para um aumento da temperatura de 5 a 35°C.

Quando um líquido está em contato com outro fluido, há uma energia interfacial livre presente entre eles. Esta energia interfacial surge a partir da diferença entre a atração das moléculas no interior de cada uma das fases e a superfície de contato, manifestando-se como **tensão interfacial** (BEAR 1972 e 1979).

Também pode ser definida como a quantidade de trabalho necessário para separar uma unidade de área de uma substância da outra (BEAR, 1972, 1979 e FETTER 1992).

Pode ser explicada como a resultante das forças de atração de curto alcance, de moléculas do líquido, denominadas forças moleculares de coesão, ou forças moleculares de London-van der Waals (LIBARDI, 2010).

Estas interações apresentam maior intensidade na camada superficial do líquido, também denominada de “camada ativa”, onde ocorre contração, devido às forças das ligações moleculares de coesão, proporcionando um acúmulo extra de energia potencial, chamada de energia potencial superficial.

Pode ocorrer de duas maneiras, sendo uma no contato entre um líquido e um gás (Tensão Superficial) e outra entre dois líquidos (Tensão Interfacial).

A tensão superficial é responsável pelos efeitos da capilaridade, e a intensidade da tensão interfacial de um fluido será sempre menor que a tensão superficial deste mesmo fluido (MERCER; COHEN, 1990). Grandes valores de tensão superficial proporcionam altos valores de pressão capilar.

A tensão superficial, ou interfacial, é uma medida de força por comprimento e pode ser expressa matematicamente pela seguinte equação:

$$\sigma = \frac{F}{L} \quad \text{(Equação 4)}$$

Onde:

σ – tensão superficial ou interfacial (N/m)

F – força de atração (N);

L – superfície de contato (m).

A **Figura 1** apresenta a relação entre as diferentes tensões possíveis num sistema trifásico.

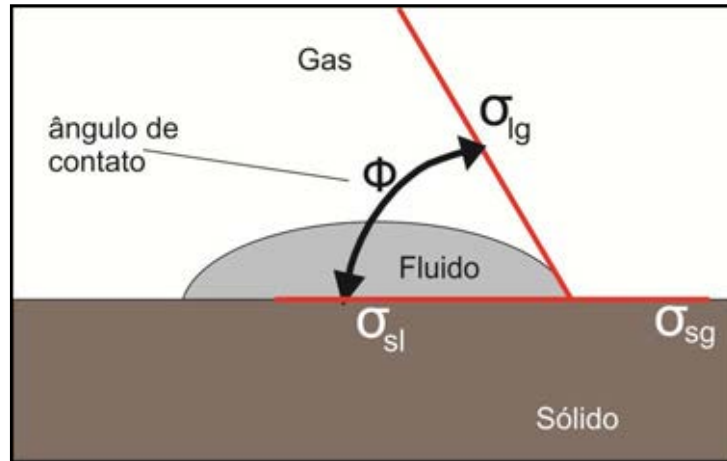


Figura 1 - Tensões interfaciais em um sistema trifásico

Onde:

ϕ = ângulo de contato;

σ_{sl} = tensão superficial entre sólido e líquido;

σ_{lg} = tensão interfacial entre líquido e gás;

σ_{sg} = tensão interfacial entre sólido e gás.

Em semelhança ao modelo capilar de Buckingham (1907), a Tensão Interfacial entre água e óleo, pode ser expressa dada pela seguinte equação:

$$\sigma_{ow} = \frac{r \cdot h \cdot g (\rho_w - \rho_o)}{2 \cos \phi} \quad (\text{Equação 5})$$

Onde:

σ_{ow} = tensão interfacial entre NAPL e água (N/m)

r = raio do menisco capilar (m)

h = elevação do líquido no capilar (m)

g = aceleração da gravidade (m/s^2)

ρ_w = densidade da água (kg/m^3)

ρ_o = densidade do NAPL (kg/m^3)

ϕ = ângulo de contato

O ângulo de contato, por convenção (FETTER, 1992), é obtido no líquido mais denso.

A **Tabela 2** apresenta os valores para tensão superficial, determinados para diferentes fluidos.

Tabela 2 – Tensão superficial de diversos fluidos a 20°C (modificado de VALLERO, 2004)	
Fluido	Tensão Superficial (N/m)
Acetona	$23,60 \times 10^{-3}$
Benzeno	$28,90 \times 10^{-3}$
Etanol	$23,60 \times 10^{-3}$
Glicerina	$63,10 \times 10^{-3}$
Querosene	$26,00 \times 10^{-3}$
Mercúrio	$519,00 \times 10^{-3}$
Tetraclorometano	$23,60 \times 10^{-3}$
Tolueno	$28,50 \times 10^{-3}$
Água	$72,80 \times 10^{-3}$

Conforme pode ser analisado na tabela acima, a tensão superficial também é condicionada pela temperatura do ambiente onde o fluido se encontra.

O “*CRC Handbook of Chemistry and Physics*”, em sua nonagésima edição, traz uma descrição da variação da tensão superficial da água em diferentes temperaturas. Esta relação é ilustrada no **Gráfico 1**, com a tensão superficial disposta em “*mN/m*” para facilitar a visualização.

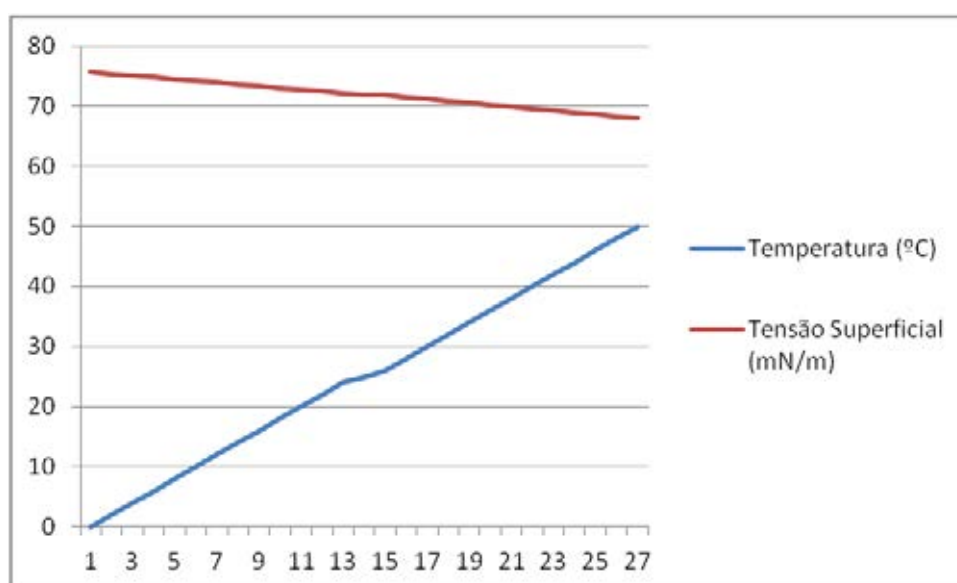


Gráfico 1 - Variação da Tensão Superficial da água a diferentes temperaturas

Na geologia, assim como nas demais ciências que estudam o solo, a **porosidade** de determinado meio pode ser definida como uma medida da capacidade de armazenamento de fluidos em seus espaços internos, podendo ser expressa como a razão entre o volume de poros pelo volume total do material, ou seja:

$$\eta = \frac{\text{Volume dos vazios}}{\text{Volume total da amostra}} \quad (\text{Equação 6})$$

Onde:

η = porosidade.

A água se movimenta num solo saturado de acordo com seus potenciais. Conforme a intervenção desses potenciais tem-se uma porcentagem de poros onde a água é drenada, principalmente devido à ação da gravidade, determinando assim uma porosidade efetiva. No entanto há uma quantidade complementar de água que não é drenada dos poros por gravidade, denominada de retenção específica ou umidade irreduzível.

A **permeabilidade**, ou permeabilidade intrínseca, é uma propriedade do meio poroso que afeta o fluxo de fluidos. Ou seja, está ligada à capacidade de um meio poroso em transmitir fluidos, e é independente das propriedades deste fluido (HILLEL, 2004).

Selley (2000) menciona que a permeabilidade é controlada por diversos fatores, dentre eles a porosidade efetiva, a geometria dos poros, a tortuosidade, o tamanho dos espaços de conexão entre os poros (“garganta do poro”), a capilaridade, a viscosidade do fluido que se movimenta no meio poroso e, por fim, o gradiente de pressão.

A permeabilidade relativa é a medida da habilidade de dois ou mais fluidos migrarem através do meio poroso, quando comparado com apenas um fluido (TESTA; WINEGARDNER, 2000).

Bear (1972) menciona que a permeabilidade relativa depende da saturação do meio pelo fluido considerado.

A **molhabilidade** pode ser definida como a tendência de determinado fluido em se espalhar ou aderir a superfície de um sólido, num sistema com dois fluidos.

A molhabilidade pode ser dada pela medida do ângulo formado entre líquido e sólido (rocha), chamado de ângulo de contato, e pode variar de 0° , num fluido perfeitamente molhante, a 180° , para perfeitamente não-molhante. Segundo Anderson (1986), a medida do ângulo de contato entre um fluido puro e uma superfície artificial é uma das melhores maneiras de se determinar a molhabilidade, devido a isenção de interferentes como surfactantes e outros compostos que alterem a molhabilidade.

A **Figura 2** apresenta diferentes configurações de fluidos molhantes e não-molhantes e os respectivos ângulos de contato.

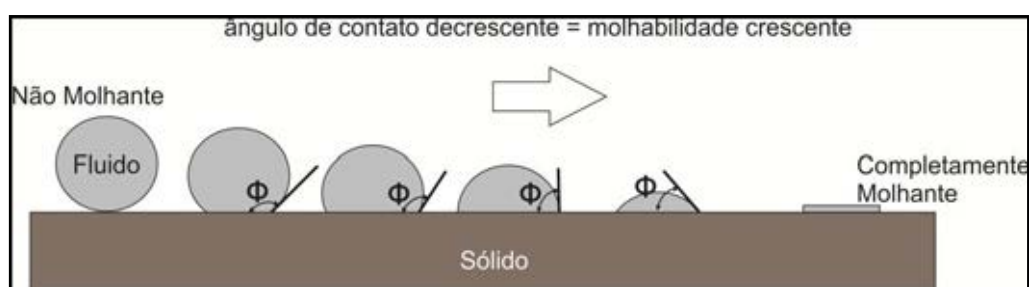


Figura 2 – Relação entre molhabilidade e ângulo de contato (Modificado de Anderson, 1986).

Richards (1931) menciona que o movimento de fluidos num meio poroso não saturado está sujeito a leis ordinárias da termodinâmica, sendo ocasionado pela ação direta da gravidade e do gradiente de pressão exercida sobre o líquido, ou fluido, considerado.

O conceito de energia da água presente no solo leva em consideração que esta se encontra, assim como os demais corpos da natureza, sujeita à ação das forças cinética, potencial e interna, relativa a forças moleculares (LIBARDI, 2010).

Conforme Hillel (2004), na física clássica há duas principais formas de energia, a cinética e a potencial. A energia potencial, relativa à posição ou condição interna em que um corpo, ou fluido, se encontra, é de fundamental importância na determinação do estado e movimento da água em um solo. Por outro lado, a baixíssima velocidade de fluxo da água no solo torna a energia cinética praticamente desprezível, não sendo, portanto, levada em consideração.

Considerando-se o princípio de que a água tem a tendência espontânea de mover-se de um ponto onde a energia potencial é superior para outro de menor intensidade, ela é suscetível ao equilíbrio com o meio em que interage, ficando em uma condição de energia potencial uniforme.

De acordo com a *International Soil Science Society* (ASLYNG, 1963, *apud* NITAO e BEAR, 1996), o potencial total da água no solo é definido como "a quantidade de trabalho útil que deve ser realizado, para o transporte, em condição reversível e isotérmica, de uma quantidade infinitesimal de água de um reservatório sob condições padronizadas (água pura, a uma elevação especificada e pressão atmosférica) para a água do solo na cota em consideração".

Segundo Bear e Cheng (2010), o potencial total de energia em um fluido pode ser decomposto em Potencial Matricial; Potencial Osmótico, ou de soluto; Potencial Gravitacional; e Potencial Térmico. Outros tipos de potenciais existentes não serão aqui levados em consideração por não terem grande significância no comportamento geotécnico e de fluxo multifásico.

O potencial total da água no solo pode ser expresso da seguinte maneira:

$$\Phi_t = \Phi_g + \Phi_p + \Phi_o + \Phi_m \quad (\text{Equação 7})$$

Onde:

Φ_t – potencial matricial (L^2T^{-2});

Φ_g – potencial gravitacional (L^2T^{-2});

Φ_p – potencial de pressão (L^2T^{-2});

Φ_o – potencial osmótico (L^2T^{-2});

Φ_m – potencial matricial (L^2T^{-2});

- Potencial Gravitacional (Φ_g)

O **potencial gravitacional (Φ_g)** pode ser definido como o equivalente à energia potencial proporcionada pelo campo gravitacional, determinado a partir de um ponto de referência.

O **potencial de pressão ou pneumático (Φ_p)** é originado da influência

de pressões diferentes da atmosférica. Segundo Soto (2004), este potencial apresenta grande importância para os ensaios de placa de pressão.

O **potencial osmótico (ϕ_o)** está relacionado à presença de solutos (sais minerais e substâncias orgânicas) na água do solo, em comparação à água pura, ocasionando diferença de composição e concentração entre elas.

O **potencial matricial (ϕ_m)**, segundo Libardi (2010), está associada às forças que se manifestam conforme a distribuição da matriz do solo, sendo relacionadas aos fenômenos de capilaridade e adsorção, as mesmas que serão tratadas com maior detalhe no capítulo seguinte.

Em muitos casos, ao invés de potencial matricial (ϕ_m), que apresenta valor negativo, muitos autores preferem, por conveniência, utilizar o termo pressão capilar ($P_c = -\phi_m$), ou sucção matricial (S_m), em função dos seus efeitos.

Apesar de o potencial matricial ser composto por dois fenômenos, tais como a capilaridade e a adsorção, geralmente a magnitude total da energia gasta é atribuída à capilaridade, pois na maioria dos solos é muito superior à adsorção, tornando esta última desprezível.

Como foi visto anteriormente, a pressão capilar também leva em consideração a adsorção. A esse respeito, a superfície do sólido interage com o fluido do meio, devido a atração elétrica entre as partículas do solo e da água, e também pelas forças de London-van der Waals. Em ambos os casos os campos de atração são de curto alcance, proporcionando a formação de uma camada de água muito fina ao redor das partículas do solo (LIBARDI, 2010).

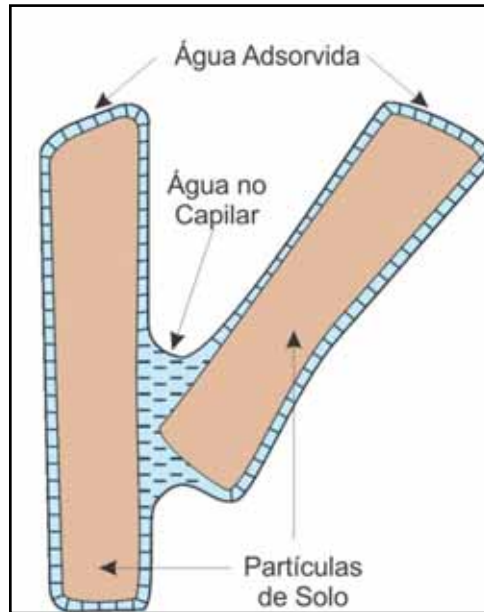


Figura 3 – Presença de água capilar e adsorvida em partículas de solo (Modificado de HILLEL, 2004)

Em relação à capilaridade, a depender do líquido envolvido no sistema fluido-sólido, pode ocorrer a ascensão capilar, como no caso na interação água-sólido, e a depressão capilar, como ocorre na interação mercúrio-sólido.

Fato de importância relacionado à tensão superficial, descrito por Libardi (2010), refere-se ao formato da superfície do líquido. Se esta modificar de plana para curva há o surgimento de uma nova pressão no sistema que, quando atuando no mesmo sentido da pressão principal do sistema ocorre a formação de uma superfície convexa e, quando em sentido contrário, há a formação de uma superfície côncava.

Portanto, segundo a pressão interna de um líquido, a superfície deste pode se comportar como plana, convexa ou côncava, conforme ilustrado na **Figura 4**.

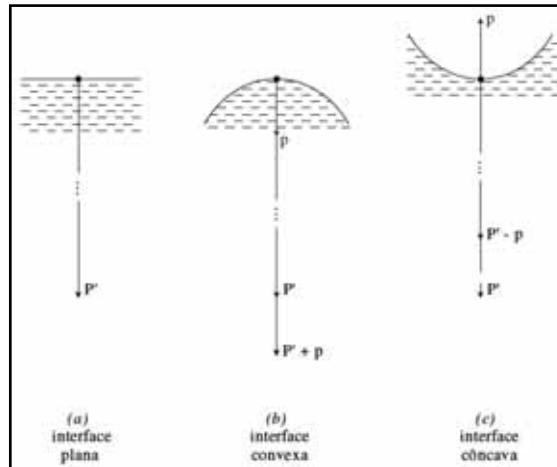


Figura 4 - Pressão interna em superfícies plana, e côncava (LIBARDI, 2010).

Neste cenário deduz-se que a pressão p , causada pela curvatura da superfície do líquido, está relacionada à tensão superficial e aos raios de curvatura formados na superfície (R_1 e R_2).

$$p = \sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad \text{(Equação 8)}$$

Esta equação também é conhecida como equação de Laplace para capilaridade (LIBARDI, 2010).

De acordo com a teoria capilar de Buckingham (1907), a pressão capilar também pode ser definida como a diferença de pressão entre dois fluidos, expresso pela **Equação 9**. Sendo a pressão de fluido molhante P_m e a pressão do fluido não molhante P_{nm} , tem-se a pressão capilar (P_c) pela equação:

$$P_c = P_{nm} - P_m \quad \text{(Equação 9)}$$

Pode-se calcular a pressão capilar por intermédio da equação de Young e Laplace, conforme ilustrado em API, 2007:

$$P_c = \frac{2 \cdot \sigma_{nmm} \cdot (\cos\phi)}{r} \quad \text{(Equação 10)}$$

Onde:

P_c = pressão capilar (N/m^2)

σ_{nm} = tensão interfacial entre molhante e não-molhante (N/m)

ϕ = ângulo de contato

r = raio do menisco (m)

3.2. Curvas de Saturação no Solo

A relação entre a água contida no solo e a pressão capilar existente neste solo possui diversas denominações. Dependendo da área de especialização, ou interesse, se hidrogeologia, agronomia, engenharia civil, ou engenharia do petróleo, pode ser chamada de curva de saturação, curva de retenção, curva característica da água no solo ou curva de pressão capilar, respectivamente. No presente trabalho foi adotada a expressão “*curva de saturação*” para representar esta relação.

A curva de pressão capilar, ou de saturação, ilustra a relação entre pressão capilar e a saturação do fluido molhante no meio poroso que, segundo Charbeneau (1992), é função da distribuição dos tamanhos dos poros do solo. Incrementos na pressão capilar proporcionam o movimento da interface entre um fluido não molhante e outro molhante para dentro de poros menores, resultando num aumento da saturação do meio em fluido não molhante e, conseqüentemente, diminuindo a saturação no fluido molhante (API, 2007).

A **Figura 5** representa diferentes formas da curva de saturação, obtida para diferentes solos, evidenciando que a distribuição do tamanho dos grãos é fator controlador do formato da curva. Tuller e Or (2005) mencionam ainda que a representação de uma curva de saturação é fortemente influenciada pela textura e estruturação de um solo, além da presença de matéria orgânica.

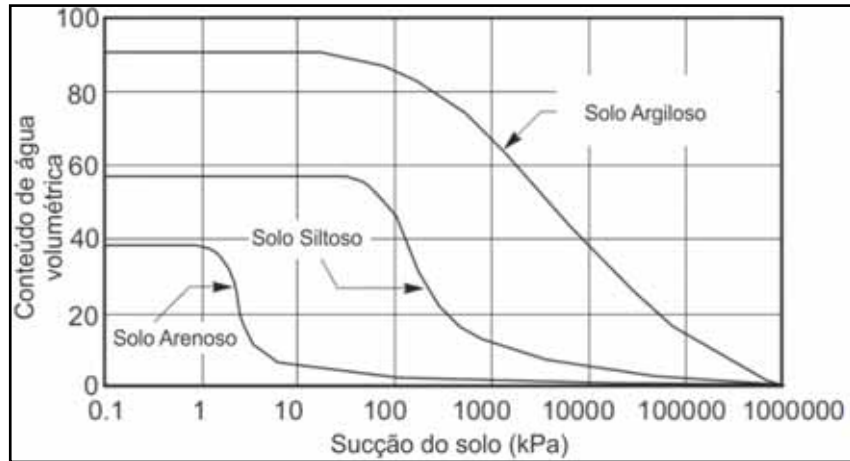


Figura 5 - Curva de saturação para solos arenosos, siltosos e argilosos (Adaptado de FREDLUND; XING, 1994)

Na **Figura 6** pode-se observar alguns componentes da curva de saturação de um solo como o teor de umidade volumétrica de saturação para a curva obtida pelo processo de drenagem (θ_s); o teor de umidade volumétrica de saturação para a curva obtida pelo processo de embebição (θ'_s); o conteúdo de ar residual ($\theta_s - \theta'_s$); o teor de umidade volumétrica residual ou irreduzível (θ_r); além da pressão de entrada de ar, que corresponde à pressão capilar que dá início à desaturação.



Figura 6 – Elementos presentes em uma curva de saturação (Adaptado de FREDLUND; XING, 1994)

Note-se que a curva de saturação de um solo é diferente da curva de drenagem, para este mesmo solo. Este fenômeno é descrito como histerese (Ahmed, 2010; Fredlund e Xing, 1994; Soto, 1999; Tuller e Or, 2005).

Segundo Ahmed (2010) a diferença dada na curva de pressão capilar entre os fenômenos de saturação e drenagem está intrinsecamente relacionada

com a diferença entre os ângulos de contato fluido-sólido. Soto (1999) correlaciona outros fatores como irregularidades dos poros, aprisionamento de bolhas de ar, devido a repetição sequencial de saturação e drenagem e alterações na estrutura do solo.

Esta diferença entre as formas das curvas de pressão capilar nos fenômenos de embebição e drenagem é denominada de histerese, e depende, segundo API (2007), da história de saturação e drenagem do solo analisado.

Segundo Tuller e Or (2005), a presença da histerese em curvas de saturação pode estar relacionada a vários fenômenos, incluindo a falta de uniformidade na forma e no tamanho dos poros interligados; a drenagem ser governada pelos poros menores, enquanto saturação ser dependente dos poros maiores; diferença nos ângulos de contato (sólido-líquido) no avanço e recuo do menisco da água; ar retido no solo; e o inchaço e encolhimento do solo durante os processos de saturação e drenagem.

Ao longo dos anos inúmeros modelos empíricos foram propostos para simular-se as curvas de saturação (FREDLUND, 1994). Estes modelos permitem a obtenção indireta de várias propriedades mecânicas e hidráulicas em solos não saturados, bem como do fluxo multifásico.

Entre os modelos existentes podemos citar os propostos por Brooks-Corey (1964), van Genuchten (1980), Durner (1992) e Fredlund-Xing (1994), conforme Burger e Shackelford (2001) e Soto (2004):

- Brooks-Corey (1964)

$$\theta = \begin{cases} \theta_r + (\theta_s + \theta_r) \left(\frac{\psi_a}{\psi}\right)^\lambda; & \psi_a < \psi \\ \theta_s; & \psi \leq \psi_a \end{cases} \quad (\text{Equação 11})$$

- van Genuchten (1980):

$$\theta = \theta_r + \frac{(\theta_s + \theta_r)}{[1 + (\alpha h)^n]^m} \quad (\text{Equação 12})$$

$$m = 1 - 1/n \quad (\text{Mualem, 1976}) \quad (\text{Equação 13})$$

$$m = 1 - 2/n \quad (\text{Burdine, 1953}) \quad (\text{Equação 14})$$

- Fredlund-Xing (1994)

$$\theta = C(\psi) \frac{\theta_s}{\left\{ \ln \left[e + \left(\frac{\psi}{a} \right)^n \right] \right\}^m} \quad (\text{Equação 15})$$

Com

$$C(\psi) = 1 - \frac{\ln \left(1 + \frac{\psi}{\psi_r} \right)}{\ln \left(1 + \frac{10^6}{\psi_r} \right)} \quad (\text{Equação 16})$$

Onde:

θ – teor de umidade volumétrica (L^3/L^3);

θ_r – teor de umidade residual ou irreduzível (L^3/L^3);

θ_s – teor de umidade de saturação (L^3/L^3);

ψ – sucção matricial (L);

ψ_a – sucção de entrada de ar ou sucção de deslocamento (L);

ψ_r – sucção correspondente ao teor de umidade residual (L);

e – base natural do logaritmo (2,71828);

λ – índice de distribuição dos poros (parâmetro de ajuste);

h – sucção (L);

α – parâmetro empírico (L^{-1});

a – valor aproximado da entrada de ar

n, m – parâmetros de ajuste;

10^6 – valor limite de sucção para qualquer tipo de solo (P)

Segundo van Genuchten (1991) a formulação proposta por Brooks-Corey (1964) tem bom emprego para solos com textura grossa e com pouca variação na distribuição do tamanho dos poros.

O inverso do parâmetro α pode, muitas vezes, estar associado à entrada de ar nos poros (van GENUCHTEN, 1991), e quando apresenta menores valores, indicam a presença de poros de tamanhos menores (API, 2007).

As **Figuras 7, 8 e 9** ilustram diferentes tipos de ajustes (Brooks-Corey, van Genuchten e Fredlund-Xing) a dados experimentais para diferentes tipos de solo.

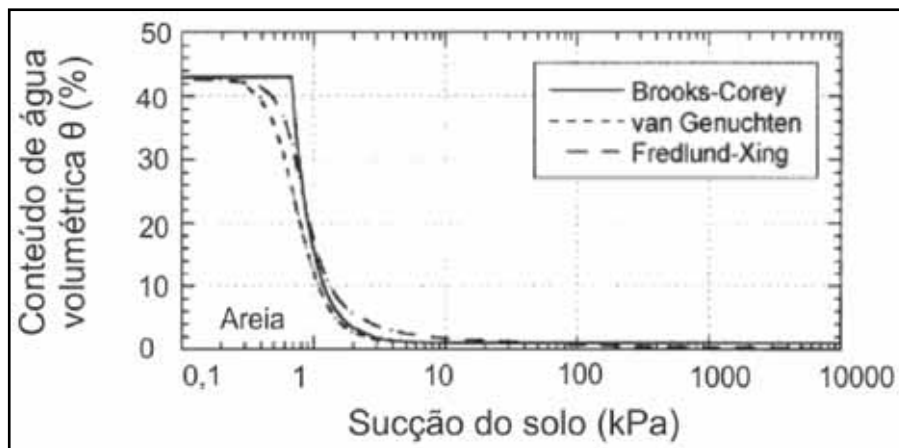


Figura 7 – Curva de Saturação para Areia utilizando as funções de Brooks-Corey, van Genuchten e Fredlund-Xing (Adaptado de BURGER e SHACKELFORD, 2001)

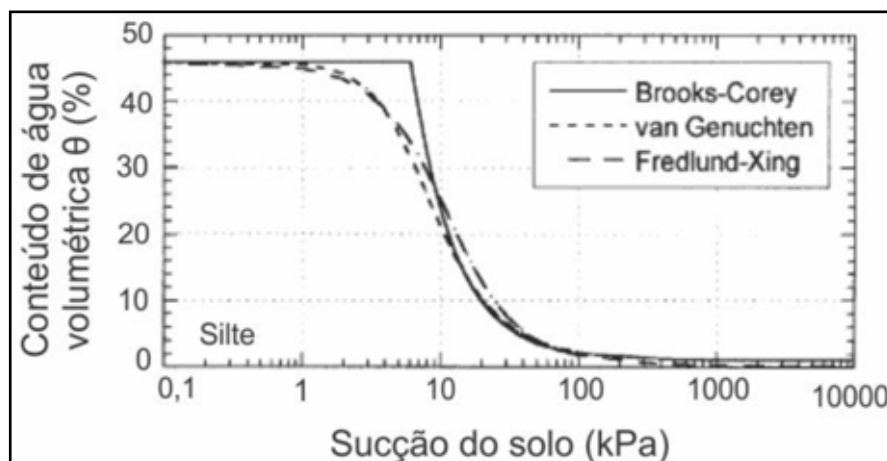


Figura 8 - Curva de Saturação para Silte utilizando as funções de Brooks-Corey, van Genuchten e Fredlund-Xing (Adaptado de BURGER e SHACKELFORD, 2001)

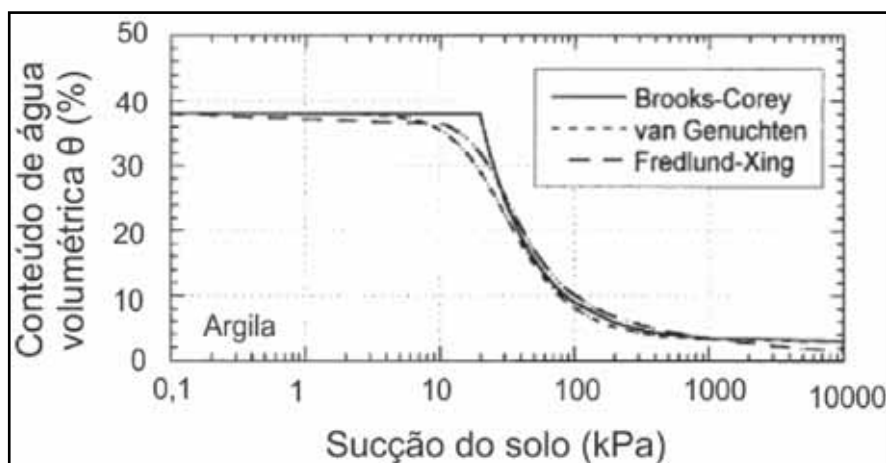


Figura 9 - Curva de Saturação para Silte utilizando as funções de Brooks-Corey, van Genuchten e Fredlund-Xing (Adaptado de BURGER e SHACKELFORD, 2001)

Em determinado solo que apresente uma distribuição dos tamanhos dos poros com caráter unimodal, não há significativa heterogeneidade em relação à sua porosidade (SOTO e CHANG, 2013).

A heterogeneidade na distribuição dos poros pode estar associada à estruturação ou agregação das partículas do solo e também a processos biológicos (MALLANTS *et al*, 1997); formando **distribuições multimodais** nos tamanhos dos poros (SOTO *et al*, 2008).

Durner (1994) relata ainda que a distribuição específica dos grãos do solo, a formação de sistemas de poros secundários e processos de agregação sofridos por solos, fazem com que a curva de saturação (retenção de água) destes solos não seja representada por modelos tradicionais.

Soto *et al* (2008) menciona que a heterogeneidade de um sistema de poros é refletida na curva de saturação, pois os tamanhos dos poros apresentam relação direta com a pressão capilar deste solo. Reporta ainda a observação que em alguns solos tropicais inalterados podem apresentar sistemas de poros heterogêneos, com distribuição multimodal do tamanho destes poros.

Durner (1994) menciona o fato de que alguns solos naturais, ou seja, solos não alterados, apresentam sistemas de poros que não são unimodais, e que a tentativa de se representar os dados de retenção às curvas sigmoidais, normalmente mostram resultados não satisfatórios. Zurmühl e Durner (1998) descrevem que, em casos de solos com distribuição bimodal de poros, o emprego de modelos unimodais não é satisfatório.

Ainda segundo este mesmo autor, pode-se considerar a heterogeneidade de um sistema de poros quando este não pode ser corretamente descrito pela função de van Genuchten.

Soto (2004) apresentou estudo evidenciando o caráter multimodal na distribuição do tamanho dos poros presentes em alguns solos de alguns estados do Brasil.

Van Genuchten et al (1991) conduziram experimentos com diversas amostras de solo que resultaram na conclusão de que o modelo proposto por van Genuchten (1980) se adequou perfeitamente à maioria das amostras, com exceção feita para os solos estruturados ou agregados, caracterizados por distinta distribuição bimodal no tamanho dos poros.

Soto e Chang (2013) mencionam que diante da bimodalidade apresentada em solos típicos do Brasil (solos tropicais), o emprego dos métodos tradicionais no ajuste das curvas de saturação pode conduzir a erros, com até duas ordens de grandeza, na condutividade hidráulica do solo não saturado.

Em experimentos realizados por Mallants *et al* (1997), foi utilizada a forma multimodal do modelo de van Genuchten, sugerido por Durner (1994), com a determinação da condutividade hidráulica por Mualem, o que resultou em condutividades hidráulicas menores do que se tivessem utilizado o modelo unimodal (Van Genuchten-Mualem).

Levando-se em consideração que os modelos tradicionais são baseados em sistemas de poros cuja distribuição é unimodal, alguns autores (Burger e Shackelford, 2001; Durner, 1994) estenderam esses modelos para solos com distribuição bimodal do tamanho dos poros, tais como ilustrados nas equações a seguir:

- Brooks-Corey (1964)

$$\theta = \begin{cases} \theta_r + (\theta_j + \theta_r) \left(\frac{\psi'_a}{\psi}\right)^{\lambda'} & ; \psi_j < \psi \\ \theta_j + (\theta_s + \theta_j) \left(\frac{\psi_a}{\psi}\right)^{\lambda} & ; \psi_a < \psi \leq \psi_j \\ \theta_s & ; \psi \leq \psi_a \end{cases} \quad (\text{Equação 17})$$

- Van Genuchten (1980):

$$\theta = \begin{cases} \theta_r + \frac{(\theta_j + \theta_r)}{[1 + (\alpha h)^n]^m}; & \psi_j < \psi \\ \theta_j + \frac{(\theta_s + \theta_j)}{[1 + (\alpha_j h)^{n_j}]^{m_j}}; & \psi \leq \psi_j \end{cases} \quad (\text{Equação 18})$$

- Fredlund-Xing (1994)

$$\theta = \begin{cases} C(\psi) \frac{\theta_j}{\left\{ \ln \left[e + \left(\frac{\psi}{a} \right)^{n'} \right] \right\}^{m'}}; & \psi_j < \psi \\ C(\psi) \frac{\theta_s}{\left\{ \ln \left[e + \left(\frac{\psi}{a} \right)^{n'} \right] \right\}^m}; & \psi \leq \psi_j \end{cases} \quad (\text{Equação 19})$$

Com

$$C(\psi) = \begin{cases} 1 - \frac{\ln \left(1 + \frac{\psi}{\psi_r} \right)}{\ln \left(1 + \frac{10^6}{\psi_r} \right)}; & \psi_j < \psi \\ 1 - \frac{\ln \left(1 + \frac{\psi}{\psi_r} \right)}{\ln \left(1 + \frac{10^6}{\psi_r} \right)}; & \psi \leq \psi_j \end{cases} \quad (\text{Equação 20})$$

Onde:

θ – teor de umidade volumétrica (L^3/L^3);

θ_r – teor de umidade residual (v);

θ_s – teor de umidade de saturação (L^3/L^3);

θ_j – junção do teor de umidade volumétrica (L^3/L^3);

ψ – sucção matricial (L);

ψ_a – entrada de ar ou sucção de deslocamento (L) - macroscópica;

ψ'_a – entrada de ar ou sucção de deslocamento (L) - microscópica;

ψ_r – sucção correspondente ao teor de umidade residual (L) - macroscópica;

ψ'_r – sucção correspondente ao teor de umidade residual (L) - microscópica;

ψ_j – junção da sucção matricial (L);

e – base natural do logaritmo (2,71828);
 λ – índice de distribuição dos poros (parâmetro de ajuste) – macroscópica;
 λ' – índice de distribuição dos poros (parâmetro de ajuste) – microscópica;
 a – valor aproximado da entrada de ar – macroscópica;
 a' – valor aproximado da entrada de ar – microscópica;
 n, m – parâmetros de ajuste – macroscópica;
 n', m' – parâmetros de ajuste – microscópica;
 n_j – junção dos parâmetros de ajuste;
 m_j – junção dos parâmetros de ajuste;
 α – parâmetro empírico (L^{-1});
 α_j – junção do parâmetro empírico (L^{-1});
 10^6 – valor limite de sucção para qualquer tipo de solo (P).

Seguindo a superposição linear no modelo de Van Genuchten proposta por Durner (1992), tem-se:

$$S_e(\psi) = \frac{\theta + \theta_r}{\theta_s + \theta_r} = \begin{cases} \sum_{i=1}^k w_i [1 + (\alpha_i |\psi|)^{n_i}]^{-m_i}; & \psi < 0 \\ 1 & \psi \geq 0 \end{cases} \text{ (Equação 21)}$$

Onde:

$S_e(\psi)$ – saturação efetiva (-);
 θ – conteúdo de água volumétrico (-);
 θ_r – conteúdo de água residual (-);
 θ_s – conteúdo de água de saturação (-);
 k – modalidade do modelo;
 w_i – fator de peso para as subcurvas ($0 < w_i < 1$; $\sum w_i = 1$);
 α_i – parâmetro empírico da subcurva (L^{-1});
 n_i - parâmetro empírico da subcurva (-);
 m_i - parâmetro empírico da subcurva (-).

A curva de saturação do solo pode ser determinada em laboratório por

métodos de deslocamento, que são baseados em equilíbrios hidrostáticos sucessivos, e por métodos dinâmicos com fluxos variados.

Aparelhos foram desenvolvidos para a determinação, em laboratório, da curva de retenção da água em solo, de saturação, de pressão capilar, ou simplesmente curva característica do solo.

Dois métodos foram empregados neste trabalho: o do Funil de placa porosa (ou placas de sucção), proposta por Haines em 1930 e o das Câmaras de Pressão com placa porosa (ou placa de pressão), descrita por Richards em 1941.

O **funil de placa porosa**, ou funil de Haines (1930), é um dos equipamentos utilizados para medição da pressão capilar em amostras de solo. Na **Figura 10** é ilustrado o procedimento para a medida da pressão capilar com o funil de placa porosa, onde em (a) a amostra de solo está saturada e a água das duas extremidades do funil encontra-se em equilíbrio de potenciais, e em (b) é ilustrado o momento do deslocamento (h), com conseqüente drenagem da água da amostra de solo.

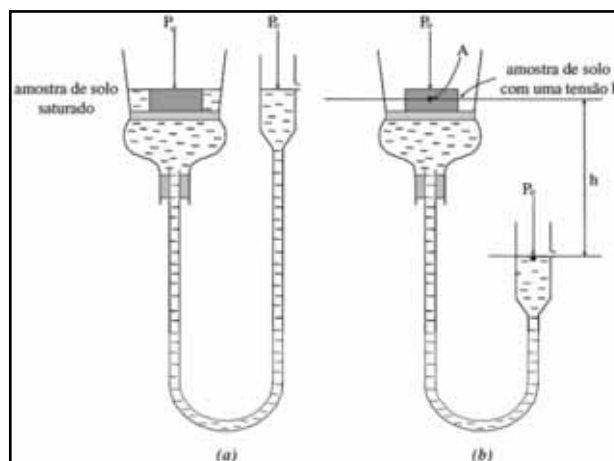


Figura 10 – Esquema do Funil de Placa Porosa (LIBARDI, 2010).

Após a colocação de uma amostra saturada em contato hidráulico com a placa porosa, seu funcionamento é baseado na mudança do nível de água na mangueira que liga as duas extremidades do equipamento, gerando uma diferença de pressão entre as duas colunas de água, produzindo uma pressão capilar com magnitude $h(m)$ na amostra de solo (CÁSSARO, 2008; LIBARDI,

2010), e conseqüentemente uma drenagem de água até atingir equilíbrio de potenciais.

Libardi (2010) descreve que com o deslocamento (h), os meniscos presentes nos capilares da placa porosa decrescem, ou seja, suas interfaces são drenadas para baixo. Este fato acontece até um valor máximo de h , que é o limite máximo quando o raio de curvatura do menisco se torna igual ao raio poro máximo da placa. Valores maiores que este máximo de h proporcionam a entrada de ar na placa porosa.

As limitações deste equipamento residem no fato de que em pressões negativas abaixo de, aproximadamente, 70 Kpa, apresentam problemas de cavitação, fenômeno ligado à separação em fases do fluido envolvido, limitando a construção de curvas de saturação para uma maior faixa de pressão capilar.

As limitações apresentadas pelo método do funil de placa porosa, podem ser superadas utilizando-se as **câmaras de pressão com placa porosa, ou de Richards**, onde as pressões aplicadas são correspondentes às pressões capilares pelo método da translação dos eixos (ALFARO, 2004).

Neste método a água do solo é expulsa pelo ar que é inserido nas câmaras de pressão, hermeticamente fechadas, e o volume de água retirado da amostra é extraído da câmara através das placas cerâmicas. Sendo assim, à diferentes pressões aplicadas ao sistema (equivalentes à pressão capilar no solo), quantidades proporcionais de água são expulsas da amostra de solo, conforme a distribuição e arranjo interno dos poros presentes nesta amostra.

Segundo Richards (1941), o sistema da câmara de pressão com placa porosa pode ser utilizado no auxílio da determinação das curvas de saturação de um solo, assim como no estudo da permeabilidade do meio poroso presente na zona não saturada, que necessitem de um grande intervalo de pressão.

Geralmente as medidas realizadas para a determinação das curvas de saturação são realizadas em sistemas Ar-Água, e a extrapolação destas medidas para sistemas envolvendo a presença de outros fluidos depende da adoção de determinadas correlações físicas. Essa obtenção das curvas de saturação de maneira indireta relaciona-se às estimativas de volume de LNAPL recuperável presente em determinado meio poroso, pela determinação da saturação efetiva

deste meio e, por conseguinte, da permeabilidade relativa.

O modelo proposto por Charbeneau (API, 2007) é derivado a partir das equações de van Genuchten (1980) e Brooks e Corey (1964) para curva de retenção Ar-Água no solo. Particularmente, quando baseado no modelo de van Genuchten (1980) (Equação 12), a correlação entre as curvas Ar-Água e os demais fluidos dependerá principalmente do parâmetro α . Isto devido a α estar diretamente associado à pressão capilar, e que a distribuição dos tamanhos dos poros (n) não se altera com a mudança de fluido presente no meio poroso. Assim, segundo este modelo, tem-se:

$$\alpha_{ow} = \frac{\sigma_{aw}}{\sigma_{ow}} \alpha \quad (\text{Equação 22})$$

$$\alpha_{ao} = \frac{\sigma_{aw}}{\sigma_{ao}} \alpha \quad (\text{Equação 23})$$

Onde:

α_{ow} – van Genuchten parâmetro ajustado para sistema óleo-água;

α_{ao} – van Genuchten parâmetro ajustado para sistema ar-óleo;

σ_{aw} – tensão superficial ar-água;

σ_{ao} – tensão superficial ar-óleo;

σ_{ow} – tensão interfacial óleo-água.

Parker, Lenhard e Kuppusamy (1987) mencionam que ao assumir o meio poroso como fixo e, sendo a interação fluido-sólido mínima, a geometria da interface fluido-fluido, num sistema multifásico, dependerá somente da distribuição dos tamanhos dos poros, e da tensão interfacial entre o par de fluidos considerado.

Ainda segundo vários autores (LEVERETT, 1941 e PARKER, LENHARD e KUPPUSAMY, 1987), o comportamento de um sistema trifásico pode ser estimado a partir de medidas experimentais realizadas em sistema bifásicos.

Lenhard e Parker (1987) definem a relação:

$$\beta_{aw}h_{aw} = \beta_{ow}h_{ow} = \beta_{ao}h_{ao} \quad (\text{Equação 24})$$

$$\beta_{ow} = \sigma_{aw}/\sigma_{ow} \quad (\text{Equação 25})$$

$$\beta_{ao} = \sigma_{aw}/\sigma_{ao} \quad (\text{Equação 26})$$

$$\beta_{aw} = 1 \text{ (por convenção)} \quad (\text{Equação 27})$$

Neste caso a obtenção indireta da pressão capilar para o sistema ar-óleo é dado por:

$$h_{ao} = h_{aw} \frac{\sigma_{ao}}{\sigma_{aw}} \quad (\text{Equação 28})$$

Onde:

h_{ao} – pressão capilar para o Querosene (cm);

h_{aw} – pressão capilar para Água (cm);

σ_{aw} – tensão superficial da Ar-Água (mN/m);

σ_{ao} – tensão superficial do Ar-Querosene (mN/m).

Com os valores de h_{ao} determinam-se os valores indiretos do teor de umidade para o Querosene:

$$\theta_o = \theta_a \frac{\rho_o}{\rho_a} \quad (\text{Equação 29})$$

Onde:

θ_o – teor de umidade de Querosene (L^3/L^3);

θ_a – teor de umidade da Água (L^3/L^3);

ρ_a – densidade da Água (M/L^3);

ρ_o – densidade do Querosene (M/L^3).

4. MÉTODOS EXPERIMENTAIS E ANALÍTICOS

4.1. Caracterização da Área de Estudo

O município de Rio Claro está localizado na porção centro-leste do Estado de São Paulo, a 188 km da capital paulista.

Para a presente pesquisa foi escolhido o afloramento da Formação Rio Claro situado na área do novo Fórum Trabalhista, no Município de Rio Claro, sob as coordenadas UTM 238.106,80 m E e 7.521.764,28 m S, zona 23K.

A **Figura 11** apresenta a localização da área de coleta das amostras de solo.

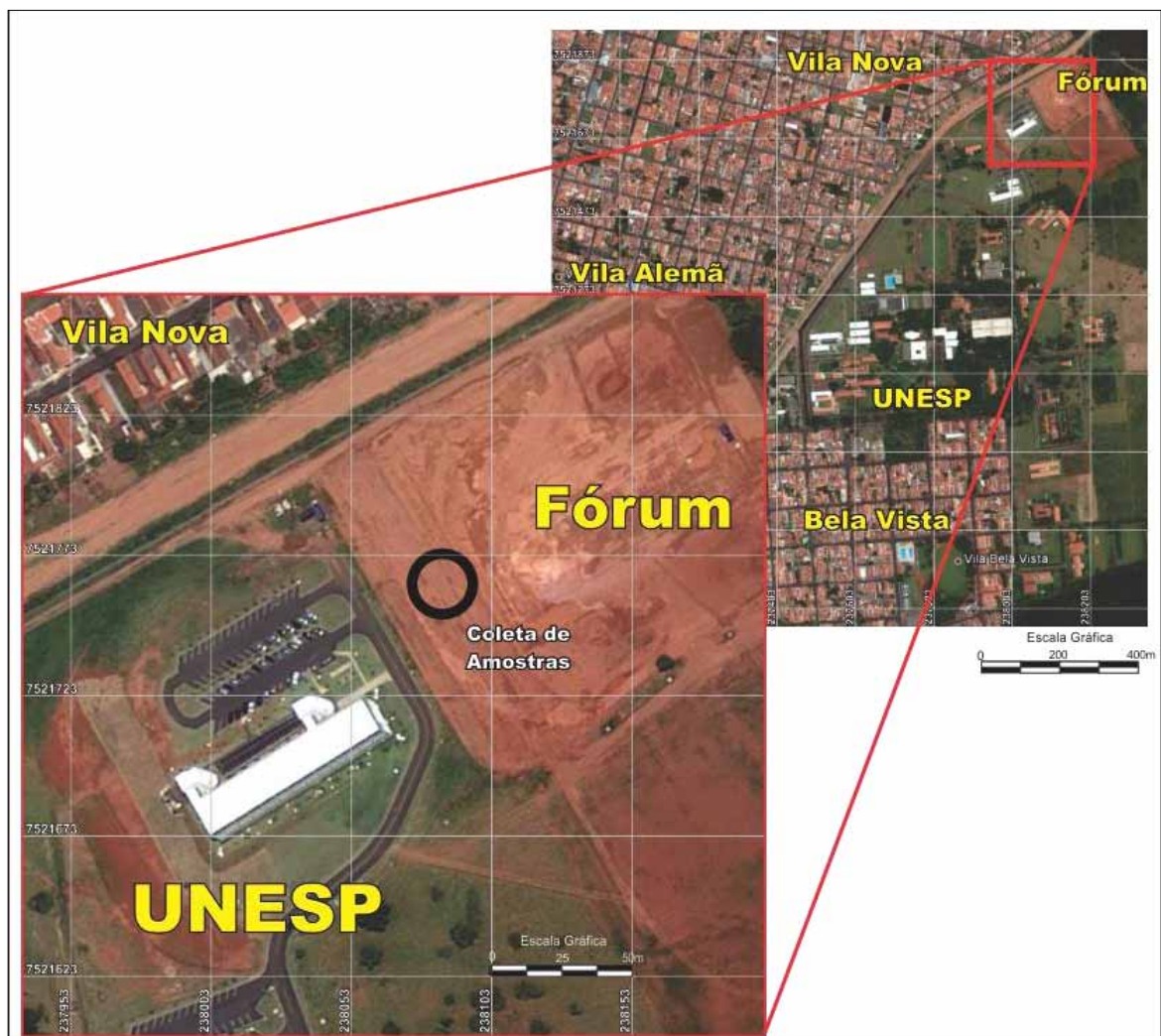


Figura 11 – Localização da área de coleta das amostras de solo.

Conforme a classificação de Koeppen verifica-se que o clima em Rio Claro pode ser classificado como “Cwa”, ou seja, Subtropical Úmido.

No Mapa de Clima do Brasil, elaborado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística em 2002, a região de estudo está inserida em um clima Tropical Úmido, com um a dois meses secos ao longo do ano.

Segundo IBGE (2004), a região do município de Rio Claro, que contempla a área de amostragem, é caracterizada basicamente por vegetação de Savana (cerrado) com contribuição antrópica.

O Mapa de Solos do Brasil, elaborado em conjunto por IBGE e EMBRAPA, em 2001 ilustra que dentro do perímetro do Município de Rio Claro são dominantes os solos descritos como Argissolos Vermelho-Amarelos e os Latossolos Vermelho-Amarelos.

IBGE (2006) faz a caracterização e distribuição dos principais relevos presentes em todo o território nacional.

Especificamente para a área que engloba o Município de Rio Claro foram definidas duas unidades distintas de relevo: a Depressão Periférica Paulista e os Patamares da Borda Oriental da Bacia do Rio Paraná.

Regionalmente o município de Rio Claro encontra-se no flanco nordeste da Bacia Sedimentar do Paraná, podendo contar com a presença de rochas sedimentares e vulcânicas, como as rochas das formações Tatuí, Irati e Corumbataí (de idade Paleozóica); Pirambóia, Botucatu e Serra Geral (de idade Mesozóica), e Formação Rio Claro (de idade Cenozóica).

A Formação Rio Claro assenta-se em discordância sobre rochas mais antigas (siltitos e argilitos) da Formação Corumbataí. De modo geral os sedimentos da Formação Rio Claro são arenosos, esbranquiçados, amarelados e róseos. Apresentam má consolidação, com latossolo areno-argiloso. São comuns as intercalações de lentes argilosas e também de níveis conglomeráticos. Segundo Zaine (1994) a presença de solo profundo na Fm. Rio Claro está associada a sua baixa litificação.

4.2. Trabalhos de Campo

Após a definição de ponto de amostragem representativo do solo da

Formação Rio Claro, que foi o do afloramento localizado na área da obra do novo Fórum Trabalhista de Rio Claro, foram coletadas as amostras indeformada e deformada de solo para as subseqüentes análises laboratoriais.

A escolha deste afloramento deu-se pela semelhança e representatividade a outros afloramentos da Formação Rio Claro, descritos por Zaine (1994).

4.2.1. Coleta de Amostras Deformadas e Indeformadas

Para a realização dos ensaios laboratoriais para a determinação da curvas de saturação nos sistemas Ar-Água, Ar-LNAPL e LNAPL-Água, foram coletadas amostras de solo deformadas e indeformadas.

As amostras retiradas em blocos, que apresentam as características naturais do solo, como estruturação e arranjo dos grãos, foi denominada de amostra indeformada. Estas amostras serviram de fonte para a retirada dos anéis volumétricos empregados nos ensaios para a determinação das curvas de saturação.

No procedimento utilizado para a retirada dos blocos de amostra indeformada foi feita a remoção de meio 0,50 m de camada superficial sujeita a contaminação antrópica, ou à ação de insetos e raízes.

Após esta remoção do solo superficial, começou-se a moldagem do bloco de solo dentro do próprio afloramento. A retirada e esculpida do bloco dentro do afloramento deu-se com a utilização de espátulas, facas e enxada.

Com o total preenchimento da caixa metálica pelo bloco de solo indeformado, este foi removido e colocado em uma prancha de madeira previamente impermeabilizada com parafina. A partir deste momento, as paredes da caixa foram removidas e a amostra foi totalmente impermeabilizada com parafina fundida.

A **Foto 1** ilustra o procedimento para a coleta do bloco de amostra.



Foto 1– Procedimento para a coleta do bloco de amostra indeformada

As amostras de solo consideradas deformadas, ou seja, desprovidas de sua estruturação natural de campo, foram retiradas para determinação de alguns parâmetros físicos do solo, como granulometria, teor de umidade e mineralogia por difração de raios-X.

A **Foto 2** ilustra parte do procedimento de coleta das amostras indeformadas.



Foto 2 – Localização do ponto de coleta das amostras indeformadas.

4.3. Ensaaios Laboratoriais

Todos os ensaios para determinação das curvas de saturação foram realizados no RAIH (Laboratório de Remediação de Áreas Impactadas por Hidrocarbonetos), do IGCE (Instituto de Geociências e Ciências Exatas) da UNESP Rio Claro.

4.3.1. Solo

Nos itens subsequentes serão apresentados os critérios e procedimentos seguidos para a determinação dos parâmetros físicos do solo.

4.3.1.1. Granulometria, Densidade do solo e Densidade dos grãos do solo

Para o conhecimento do solo trabalhado, algumas características físicas deste solo foram determinadas em laboratório, a fim de se contribuir no estudo de sua relação com os fluidos utilizados.

Alguns ensaios em que há a necessidade de se avaliar o solo em sua estruturação natural, van Lier (2010) menciona que as amostras devem ser coletadas em anéis volumétricos, com dimensões conhecidas, de forma a manter o arranjo dos sólidos iguais ao encontrado no solo *in natura*. Estas amostras são utilizadas para a determinação e caracterização da composição física de um solo.

Por outro lado, ao optar-se pela utilização de amostras deformadas, o arranjo dos sólidos é alterado não permitindo assim o cálculo de parâmetros físicos como densidade e teor de umidade.

Estes anéis apresentam as características médias dispostas na **Tabela 5**:

Tabela 3 – Característica média dos anéis de alumínio				
Diâmetro Externo (cm)	Diâmetro Interno (cm)	Espessura (cm)	Altura (cm)	Peso (g)
6,350	5,850	0,260	3,300	38,500

Quanto aos testes granulométricos foram realizados segundo norma NBR-7181/84 e a determinação da densidade dos grãos do solo, conforme normatização descrita em ABNT NBR 6508, de outubro de 1984, ambos complementados por Nogueira (1998).

4.3.1.2. Difração de Raios-X

Na continuidade ao processo de conhecimento do solo empregado no presente estudo, também foram conduzidas caracterizações de sua mineralogia.

Segundo Pereira (2004) a determinação dos grupos de minerais e argilominerais presentes no solo analisado é dada pela medida do valor da distância basal interplanar do mineral.

A determinação da mineralogia presente no solo, por intermédio da difração de raios-X, foi realizada em triplicata, em lâminas confeccionadas com a fração argila, selecionada em peneira de 400 mesh, e em fração total, composta por material bruto, ou seja, sem prévia seleção.

Após a separação da granulometria específica para cada fração as amostras foram inseridas em água deionizada em frasco plástico. Este frasco contém um furo em sua base, onde é ligada mangueira plástica com sistema “conta-gotas”. Neste sistema é controlada a vazão de retirada de água do recipiente plástico, garantindo que a água inserida contendo material em suspensão seja eliminada muito lentamente, propiciando a precipitação do material suspenso nas lâminas de vidro. O material precipitado nestas lâminas forma uma fina película do material a ser analisado.

Após este, as lâminas são colocadas em descanso para evaporação do excesso de água nelas contida.

Ao ficarem secas são encaminhadas ao Laboratório de Difração de Raios-X do IGCE da UNESP Rio Claro, onde são realizadas as leituras para cada fração selecionada, para a lâmina natural, para lâmina com etilenoglicol e posteriormente para lâmina aquecida a 550°C, permitindo desta forma a diferenciação entre os diferentes grupos de argilominerais presentes.

4.3.2. LNAPL

O LNAPL escolhido para a realização dos experimentos foi o Querosene de Aviação (QAV-1). Sua escolha foi baseada na ampla utilização deste no transporte aéreo mundial, sendo suas características básicas similares em todos os países do mundo. O Querosene de Aviação é um combustível produzido por fracionamento do petróleo, através de destilação a pressão atmosférica, sendo o combustível usado nas aeronaves com motores a turbina.

Foram adquiridos 20 L de QAV-1 da Refinaria de Paulínia, localizada no município de Paulínia, Estado de São Paulo.

As principais características físico-químicas do QAV-1 estão dispostos na **Tabela 6**, retirada da Ficha de Informação de Segurança de Produto Químico – FISPQ – BR 0030, de três de Janeiro de 2011.

Tabela 4 – Características físico-químicas do QAV-1	
Série de carbono	C9-C16
Persistência e degradabilidade	É esperada baixa degradação e alta persistência.
Pressão de vapor	Não disponível.
Densidade	0,804 g/cm ³
Solubilidade/Coefficiente de partição – n-octanol/água	Em solventes orgânicos:solúvel (Log kow: 3,3-6,0)
Temperatura de auto-ignição	238 °C.
Temperatura de decomposição	Não disponível
Viscosidade	8,0 Cst @ -20 °C (Método: ASTM-D445)
Faixa de destilação	150 -300 °C @ 101,325 kPa (760 mmHg).
Ponto de combustão	Não disponível.

No Brasil são produzidos dois tipos de Querosene de aviação, o QAV-1 e o Querosene de Aviação Especial para a Marinha do Brasil.

O Querosene brasileiro é especificado pela Agência Nacional de Petróleo (ANP), por intermédio do Regulamento Técnico ANP N° 6/2009, contido na Resolução ANP N°37, de primeiro de Dezembro de 2009, que o torna compatível ao *Aviation Fuel Quality Requirements for Operated Systems (AFQRJOS) for JET A-1*.

4.3.2.1. Tensão Superficial e Tensão Interfacial

A determinação em laboratório da tensão superficial e interfacial entre água e QAV-1 foi realizada segundo o método do anel, utilizando-se o tensiômetro da marca KRUSS, modelo K9-Mk1, da Alemanha.

Neste teste determina-se a tensão superficial e interfacial pela medição da força necessária para deslocar o anel de platina da interface ar-água, Ar-QAV, QAV-Água e QAV (SUDAN III)-Água. Em total foram realizados cinco leituras para cada tensão. A presença do SUDAN III, da Sigma-Aldrich, no QAV foi necessária para ter uma fácil separação com a água.

A avaliação das tensões envolvendo o marcador SUDAN III também foi necessária para se conhecer sua influência na modificação da tensão original do QAV.

Os testes devem ser realizados com baixas variações de temperatura, visto que as magnitudes das tensões superficiais e interfaciais são susceptíveis a mudanças térmicas.

A **Figura 12** ilustra momentos do teste para determinação da tensão superficial para QAV com SUDAN III e QAV, e interfacial para QAV com SUDAN III-Água, e QAV-Água.



Figura 12 – Determinação da Tensão Interfacial (a) Determinação da tensão interfacial Querosene (SUDAN) e Água; (b) Determinação da tensão interfacial Querosene e Água

4.4. Equipamento para determinação de curva de saturação ar/água, ar/óleo e óleo/água

4.4.1. Preparação das Amostras

As amostras de solo são retiradas dos blocos em anéis volumétricos de modo a preservarem as características originais do solo, conforme pode ser visto na **Figura 13**.

Cada anel volumétrico tem suas dimensões aferidas com paquímetro, massa determinada e identificação realizada, garantindo correspondência original de cada anel à amostra retirada.

Durante a retirada da amostra do bloco, três alíquotas de solo são separadas para a determinação da umidade do solo.



Figura 13 – Retirada de amostra indeformada e coleta de material para determinação de umidade do solo.

O anel contendo a amostra então é pesado e enrolado em filme de PVC, com posterior armazenamento em câmara úmida. Estes procedimentos são adotados para se preservar as características originais do solo.

4.4.2. Curva de saturação – Sistema Ar-Água

As curvas de saturação foram realizadas pelo processo de secagem, ou seja, as amostras tiveram que ser previamente saturadas para o início dos testes.

O processo de saturação consistiu em colocar a amostra em um conjunto papel filtro e placa porosa, tal como mostrado na **Figura 14**.

Este conjunto foi submerso parcialmente em água deionizada até a metade do anel metálico contendo a amostra, com a finalidade de saturar a amostra por meio do processo de capilaridade. A amostra foi considerada saturada quando submersa por um período mínimo de 24 horas.



Figura 14 – Saturação da amostra de solo com água

4.4.2.1. Método do Funil de Placa Porosa – Sistema Ar-Água

Uma câmara de pressão (similar ao modelo da série “1400 D Tempe Cells”, da empresa SOILMOISTURE EQUIPMENT CORP), desenvolvida por Soto e Chang (2013), no LRAIH, foi utilizada para os ensaios do método do funil de placa porosa para a determinação das curvas de saturação ar-água e ar-LNAPL em laboratório. A **Figura 15** ilustra os detalhes da câmara de pressão utilizada.

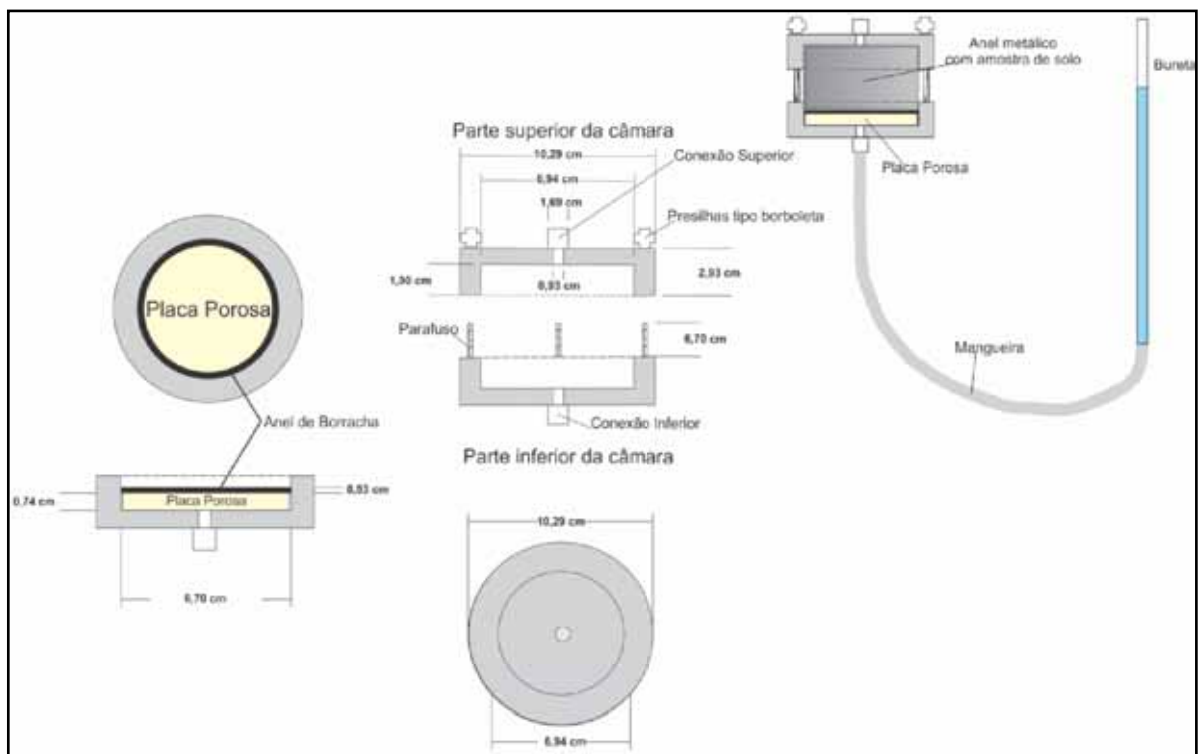


Figura 15 – Esquema da câmara de pressão utilizada no teste do funil de placa porosa.

O todo foram executados testes em cinco amostras de solo, com os seguintes números de identificação: II, III, VII, X e XI.

A montagem do equipamento obedeceu a seguinte sequência:

- 1) Determinação da massa da amostra de solo antes da saturação;
- 2) Saturação da amostra de solo em água por um período mínimo de 24 horas;
- 3) Saturação da placa porosa de cerâmica em água por um período mínimo de 24 horas;
- 4) Colocação da placa de cerâmica (1 bar) saturada na base interna da câmara de pressão, deixando fina camada de água sobre ela. Procedimento realizado dentro de um recipiente contendo água deaerada;
- 5) Preencher o espaço interno da mangueira de silicone com água deaerada;
- 6) Inserir um anel de borracha na câmara, para vedação do sistema;
- 7) Determinação da massa de solo saturado;
- 8) Colocar amostra de solo na câmara, sobre a placa porosa de cerâmica;
- 9) Colocar a bureta em suporte vertical e inserção de água deaerada até o nível de base da bureta;
- 10) Inserir pequena quantidade de vaselina líquida, tingida com SUDAN III, acima do nível da água da bureta, com a finalidade de facilitar a leitura no menisco do capilar e evitar a evaporação da água;
- 11) Conectar câmara de pressão à bureta (mediante mangueira de silicone) e fixação de tampa superior da câmara;
- 12) Ajustar nível de base da água da bureta ao nível de equilíbrio determinado pelo conjunto da câmara de pressão;
- 13) Inserir água deaerada em um balão volumétrico e acoplar, dentro dele, um termômetro.

Na **Figura16** é ilustrado o conjunto dos equipamentos utilizados nas medições do teste para o Sistema Água-Ar.



Figura 16- Aparato utilizado no teste das Placas de Sucção

O primeiro deslocamento foi realizado abaixando-se a bureta, nos primeiros cinco centímetros. A partir desse instante a água contida na amostra saturada é expulsa devido à pressão negativa imposta. Esta expulsão permanece até que haja novo equilíbrio de potenciais.

A expulsão da água para fora da amostra foi registrada por intermédio da mudança de nível do fluido na bureta, em tempos pré-estabelecidos.

O registro dessa variação foi realizado pela observação do menisco convexo formado entre a água e a vaselina líquida tingida com SUDAN III. Aparentemente depois de atingido o equilíbrio de potenciais, há o aparecimento de uma nova interface plana (água/vaselina) passando para côncava, indicando assim o que denominamos de “rebote”, ou seja, a mudança de sentido da água no sistema. A presença deste fenômeno indica que a pressão capilar da amostra torna-se superior à pressão exercida, e que novo deslocamento da bureta deverá ser realizado para o aumento da pressão no sistema.

A **Figura 17** ilustra o momento inicial do experimento, onde há a expulsão de água da amostra (lado esquerdo da foto), e o momento onde ocorre o “rebote” (lado direito da foto).

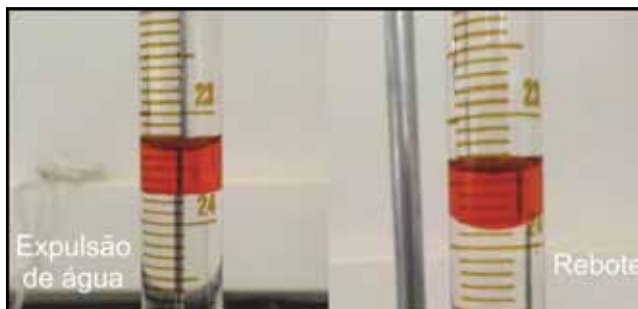


Figura 17– Momentos de expulsão de água e de rebote

Em média cada teste realizado durou aproximadamente cinco dias para finalização.

O ensaio realizado com a amostra II (primeiro dos testes) teve o diferencial de que os parafusos da câmara não foram apertados. Este fato fez com que a câmara não permanecesse vedada durante todo o experimento, proporcionando a quebra da continuidade da coluna de água na mangueira de silicone, após a realização das medições para a quinta pressão exercida (quinto deslocamento da bureta).

Para estas amostras de solo analisadas, a bureta utilizada permitiu que houvesse somente oito deslocamentos, ou seja, a pressão exercida no sistema variou de 0,5 kPa a 4,0 kPa.

No **Anexo 8.1** estão dispostas as planilhas contendo todas as medições realizadas.

4.4.2.2. Método da Câmara de Pressão – Câmara de Richards

As câmaras de pressão utilizadas foram desenvolvidas por Soto *et al* (2008) para estudos realizados na refinaria de Paulínia (REPLAN). Segundo esta técnica, também denominada de translação de eixos, as magnitudes de pressão de ar aplicadas são equivalentes aos valores de pressão capilar. Deste modo, para o processo de secagem as pressões de ar comprimido aplicadas foram

crescentes, com a finalidade de expulsar a água contida no solo a partir da amostra previamente saturada. A **Figura 18** apresenta o esquema da câmara de pressão utilizada nos ensaios realizados.

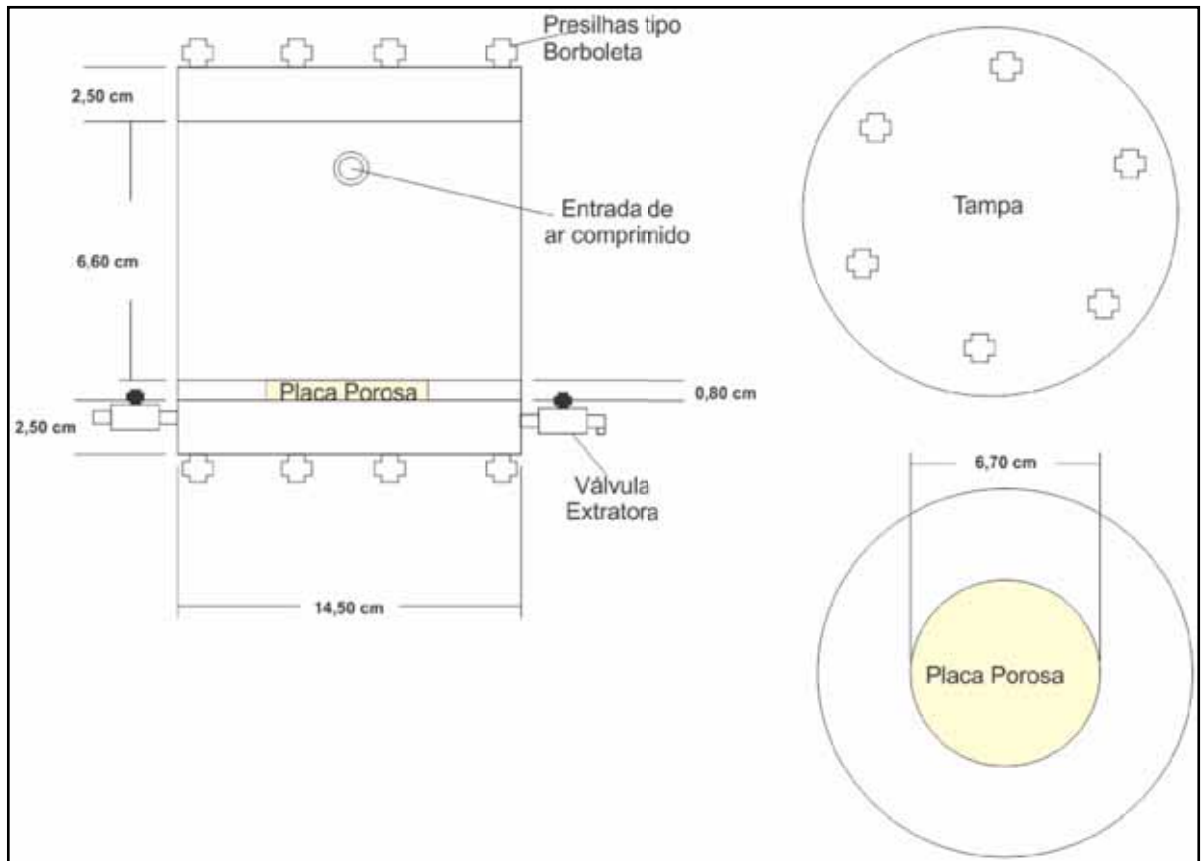


Figura 18 - Esquema da câmara de pressão utilizada.

Na **Figura 19** é ilustrado o conjunto dos equipamentos utilizados no teste com as Câmaras de Pressão de Richards.

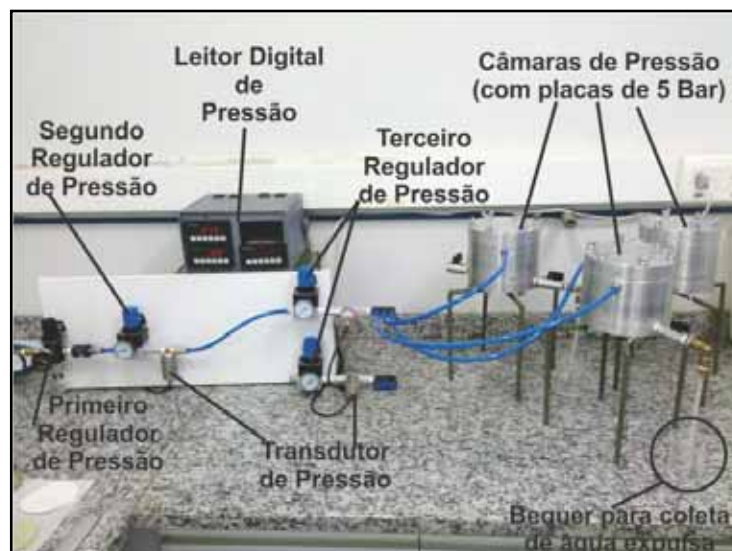


Figura 19– Aparato utilizado no teste com as Câmaras de Pressão de Richards

Há dois reguladores de pressão denominados como “Terceiro Regulador de Pressão”. Como o teste variou de 5 kPa a 400 kPa, foi necessária a adoção de dois reguladores, pois as menores pressões necessitaram de maior precisão de regulagem. Desta forma, o terceiro regulador superior aumentou a precisão de regulagem da pressão aplicada ao sistema, mas com o limitante de poder suportar somente até 250 kPa.

Desta forma, a partir da pressão de 200 kPa este terceiro regulador foi substituído pelo de baixo, que suporta até 1000 kPa. Ambos os reguladores não apresentaram oscilações nas pressões aplicadas, demonstrando precisão nas condições exercidas.

Os ensaios realizados nas câmaras de pressão tiveram o intuito de se verificar a saturação do solo em água, para pressões mais elevadas que as realizadas nos ensaios envolvendo o funil de placa porosa. Foram realizados ensaios em três amostras de solo: IV, V e VIII.

O procedimento para a realização do ensaio contou com as seguintes etapas prévias:

- 1) Inserção de água deaerada até um nível determinado dentro das câmaras;
- 2) Fechamento das câmaras de pressão;
- 3) Pressurização para expulsão das bolhas de ar contidas na água e nas cavidades internas da câmara e da placa porosa, com o intuito de eliminar toda e qualquer presença de ar que eventualmente possam estar dentro das placas porosas afixadas na base das câmaras;
- 4) Abertura da válvula de escape para eliminação da água e ar dissolvido;
- 5) Coleta da água em béquer de 200 mL;

Após dois dias neste processo, o conjunto câmara-placa porosa foi considerado pronto para o início dos testes com as amostras de solo. Com o sistema de pressão desligado, inicia-se o procedimento inicial:

- 1) Saturação da amostra de solo em água por um período mínimo de 24 horas. Esta etapa de saturação da amostra é similar ao

- adotado no teste do funil;
- 2) Colocar sobre a placa porosa, e com seu diâmetro, um papel filtro Whatman[®] n° 42;
 - 3) Retirada da amostra de solo da água e determinação de sua massa saturada;
 - 4) Colocar amostra de solo na câmara, assentada sobre o papel filtro e sobre a placa porosa de cerâmica (5 bar);
 - 5) Ligar o leitor digital de pressão;
 - 6) Abrir o primeiro regulador de pressão (de ajuste grosseiro);
 - 7) Abrir o segundo regulador de pressão (de ajuste fino);
 - 8) Abrir o terceiro (em linha) regulador de pressão (sendo este o segundo para o ajuste fino). Neste momento o teste é iniciado.

O ensaio consistiu na aplicação de uma primeira pressão positiva. Esta pressão produziu uma expulsão de água da amostra para fora do sistema através da placa porosa, que apenas permite a passagem de água e não de ar. Após um dia a amostra foi pesada para monitorar a perda de massa de água. Pesagens sucessivas e diárias permitiram observar o equilíbrio de potenciais quando a massa de solo tornou-se praticamente constante. Após atingida a constância de peso foi modificada a pressão para uma magnitude maior, onde o processo descrito anteriormente foi repetido. O ensaio terminou quando se atingiu o limite de capacidade do equipamento pneumático (400 kpa). As pressões aplicadas foram de 5, 10, 20, 50, 100, 200 e 400 kpa.

No **Anexo 8.2** estão as planilhas contendo todas as medições realizadas.

4.4.3. Curva de saturação – Sistema Ar-Querosene

4.4.3.1. Método do Funil de Placa Porosa – Sistema Ar-Querosene

Para a realização do teste do Sistema Ar-Querosene, o aparato

experimental envolvido foi praticamente o mesmo utilizado no Sistema Ar-Água (**Figuras 15 e 16**), ocorrendo apenas poucas modificações: uma relacionada à utilização da placa porosa com caráter hidrofóbico, e a outra a troca da mangueira flexível de ligação entre a câmara e a bureta.

Com estes dados a mangueira foi substituída por uma de polietileno. Devido esta substituição a conexão da mangueira com a câmara também foi substituída por uma de engate rápido.

Foram realizados quatro ensaios para o Sistema Querosene-Ar, com as amostras XIV, XXV, XXVI e XXVII.

A montagem do equipamento obedeceu à seguinte sequência:

- 1) Determinação da massa da amostra de solo antes da saturação;
- 2) Saturação da amostra de solo em querosene por um período mínimo de 24 horas;
- 3) Saturação da placa porosa de cerâmica em querosene por um período mínimo de 24 horas;
- 4) Colocação da placa de cerâmica (1 bar) hidrofóbica e saturada na base interna da câmara de pressão, deixando fina camada de querosene sobre ela. Procedimento realizado dentro de um recipiente contendo água deaerada;
- 5) Preencher o espaço interno da mangueira de polietileno com água deaerada;
- 6) Inserir um anel de borracha na câmara, para auxiliar na vedação do sistema;
- 7) Colocar a bureta em suporte vertical e inserção de querosene até o nível de base da bureta;
- 8) Conectar câmara de pressão à bureta (mediante mangueira de polietileno) e fixação da câmara;
- 9) Eliminar bolhas de ar presentes na bureta;
- 10) Determinação da massa de solo saturado;
- 11) Colocar amostra de solo na câmara, sobre a placa porosa de cerâmica;
- 12) Colocar tampa superior da câmara e apertar parafusos;
- 13) Ajustar nível de base do querosene da bureta ao nível de equilíbrio determinado pelo conjunto da câmara de pressão;

14) Inserir querosene deaerada em um balão volumétrico e acoplar, dentro dele, um termômetro.

Após o fim de cada ensaio as amostras foram encaminhadas para a estufa a temperatura de 110°C, com a finalidade de determinar o teor volumétrico final de querosene.

No **Anexo 8.3** estão dispostas as planilhas contendo todas as medições realizadas.

4.4.3.2. Tratamento das Placas Cerâmicas para testes com LNAPL

Objetivando somente a passagem de QAV pelos poros da placa cerâmica, para que fossem utilizadas nos testes do sistema água-óleo, foi seguido o procedimento proposto por Lenhard e Parker (1988), complementado por EPA (1990) e Bali *et al* (1996).

Segundo estes autores a reação do Clorotrimetilsilano com os íons de sílica sobre a superfície das placas cerâmicas formam ligações resistentes de Si-O-Si, sendo que o grupo trimetil, que fica ligado a um dos íons de sílica, repele as moléculas de água, tornando sua superfície hidrofóbica.

Dois fatos relevantes sobre o Clorotrimetilsilano devem ser considerados em sua manipulação: o primeiro é o de que apresenta forte reação exotérmica em presença de água e o outro é que apresenta alta taxa de volatilização (0,25 atm). Portanto ao se manusear este produto deve-se incluir no procedimento de trabalho máscara respiratória específica para gases ácidos e vapores orgânicos e óculos de proteção.

Para que as placas cerâmicas tornassem-se hidrofóbicas, foram utilizados os seguintes materiais:

- Placa porosa de 1 Bar de pressão (SOILMOISTURE[®]);
- Tolueno Anidro com 99,8% de pureza (Sigma-Aldrich[®]);
- Metanol Anidro com 99,8% de pureza (Sigma-Aldrich[®]);
- Clorotrimetilsilano (Sigma-Aldrich[®]);

- Recipiente de vidro tipo pirex; e
- Filme de PVC.

O procedimento consistiu em mergulhar completamente a placa porosa em um recipiente de vidro contendo Clorotrimetilsilano, por um período de duas horas. Como o Clorotrimetilsilano é altamente volátil, o recipiente foi coberto com um filme de PVC para diminuir a volatilização de produto.

Após duas horas a placa foi retirada e submersa desta vez em outro recipiente contendo Tolueno, por um período de 30 minutos e, finalmente, e de maneira análoga, em Metanol, por uma hora.

Todos os períodos de descanso realizados neste procedimento foram feitos dentro de um dessecador para diminuir a volatilização, alocada dentro de uma capela com exaustão para evitar a contaminação do ambiente, visto que os ensaios foram realizados dentro de ambiente confinado.

4.4.4. Curva de saturação – Sistema Querosene-Água

4.4.4.1. Método do Funil de Placa Porosa – Sistema Querosene-Água

O equipamento utilizado para esta etapa dos testes foi montado com a câmara de pressão do teste Ar-Água, com a diferença de que foi acrescentada placa porosa hidrofóbica na extremidade em que recebeu a passagem do Querosene.

Os testes para o sistema Querosene-Água não produziram resultados satisfatórios. Todos os ensaios realizados não chegaram ao fim, ou seja, sofreram algum tipo de contratempo que impossibilitou a coleta de dados.

O procedimento adotado para os ensaios realizados para o sistema Querosene-Água foram basicamente os mesmos, com pequenas alterações ocasionadas pelas mudanças de equipamentos ocorridos durante o desenvolvimento dos experimentos. Este procedimento foi basicamente realizado da seguinte maneira:

- 1) Determinação da massa da amostra de solo antes da saturação;
- 2) Saturação da amostra de solo (água ou querosene) por um período mínimo de 24 horas;
- 3) Saturação das placas porosas de cerâmica (hidrofóbicas e hidrofílicas), sendo uma em água e outra em querosene sem Sudan III, por um período mínimo de 24 horas;
- 4) Colocação da placa de cerâmica hidrofílica saturada na base interna da câmara de pressão, deixando fina camada de água sobre ela. Procedimento realizado dentro de um recipiente contendo água deaerada;
- 5) Preenchimento do espaço interno da mangueira silicone com água deaerada;
- 6) Retirada das bolhas de ar;
- 7) Fechamento da extremidade da mangueira com presilha;
- 8) Inserção de um anel de borracha na câmara, para vedação do sistema;
- 9) Determinação da massa da amostra de solo;
- 10) Colocação da amostra de solo na câmara, sobre a placa porosa de cerâmica hidrofóbica;
- 11) Colocação da parte superior da câmara contendo a placa porosa hidrofóbica, seguindo os mesmos passos da colocação da placa da parte inferior da câmara;
- 12) Colocação das buretas superior e inferior para cada fluido (querosene ou água);
- 13) Fixação da câmara contendo amostra no suporte vertical;
- 14) Posicionamento da altura dos fluidos da bureta coincidentes com o centro de massa do corpo de prova, ou seja, do anel contendo a amostra;
- 15) Inserção de água deaerada em um balão volumétrico e acoplamento de um termômetro em seu interior;
- 16) Inserção de querosene em um balão volumétrico e acoplamento de um termômetro em seu interior.

O início do teste foi dado deslocando-se uma distância de 5 cm os

níveis de água (2,5 cm acima do centro de massa do corpo de prova), e do querosene (2,5 cm abaixo do centro de massa do corpo de prova), para que o querosene ingressasse na amostra pela parte superior da câmara, expulsando água a cada incremento de pressão capilar.

Neste caso o nível do querosene sofreu um rebaixamento contínuo, passando o limite inferior da câmara que continha a amostra de solo, provavelmente ocasionado pela absorção do Querosene pela mangueira de silicone.

A **Figura 20** apresenta o aparato utilizado na realização deste experimento.

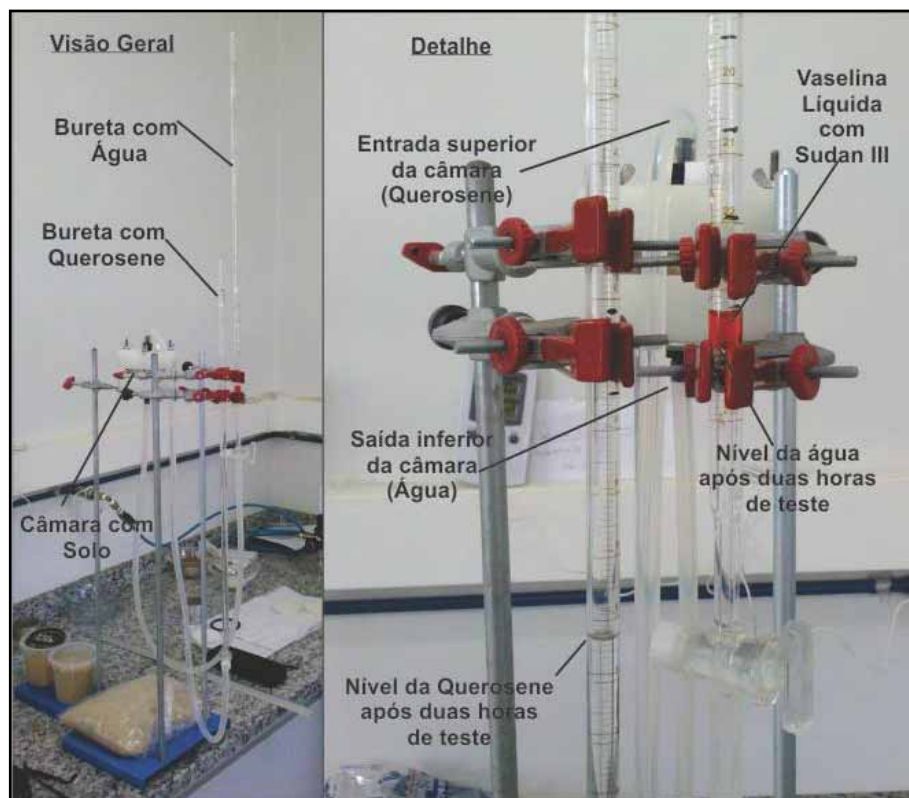


Figura 20 – Detalhe da primeira versão do equipamento para o teste do Sistema Água-Querosene.

Em uma segunda tentativa a amostra foi saturada com querosene tingido com o corante SUDAN III, tornando-se avermelhado. Este procedimento foi considerado para permitir a distinção visual entre a água e o querosene, quando este começa a invadir a câmara com a amostra.

Como na amostra anterior, este teste foi realizado com a amostra saturada em água, sendo esta expulsa pelo querosene, conforme a imposição da

pressão capilar a partir das buretas.

Após duas horas e meia de teste, a coluna do querosene conectada à câmara pela parte superior ficou descontínua, ocasionando o surgimento de bolha de ar (**Figura 21**). Este efeito provavelmente ocorreu-se devido o deslocamento de microbolhas de ar, trapeadas em condições naturais e mobilizadas após a influência da pressão inserida ao sistema.



Figura 21 - Detalhe da segunda versão do equipamento para o teste do Sistema Água-Querosene e presença de bolha de ar.

Uma nova tentativa foi realizada com o procedimento invertido. Devido à dificuldade de garantir-se a estanqueidade na montagem do experimento, optou-se por fazer com que a água ingressasse pela parte superior da câmara. Para isto a amostra foi saturada em querosene e, neste novo procedimento, a água expulsou o querosene da amostra. Mas novamente não houve estabilização do querosene dentro do sistema e o teste não prosseguiu.

Na última tentativa de ensaio foram adotadas as mesmas características de montagem do sistema anterior, porém também não houve sucesso devido à existência de descontinuidade do querosene na mangueira de conexão com a bureta.

Após estas tentativas sem sucesso, utilizando-se este tipo de montagem, foram realizadas modificações no equipamento. Desta vez em lugar de aplicar a pressão capilar por deslocamento do nível da interface água/óleo entre as buretas, foi utilizado um sistema de ar comprimido para aplicar pressão, similar ao método da Câmara de Richards, ou translação de eixos. No entanto a pressão de ar supostamente equivalente à pressão capilar no sistema foi aplicada diretamente no querosene, numa interface ar comprimido/querosene (copo de pressão). A **Figura 22** mostra em detalhe esta nova montagem. Com isso o ar entra no compartimento e empurra o querosene com a pressão determinada nos reguladores de pressão, e monitorada nos leitores digitais do transdutor de pressão, permitindo um melhor controle das pressões capilares aplicadas.



Figura 22 - Detalhe do equipamento para o teste do Sistema Água-Querosene, utilizando sistema de pressão controlada.

Uma sétima tentativa foi montado conforme ilustrado na **Figura 22**. Após três dias de teste foi verificada a presença de querosene na mangueira da base da câmara de pressão, o que não era esperado, levando o teste a ser finalizado.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. Distribuição Granulométrica e Densidade dos Grãos do Solo

As tabelas 9, 10 e 11 e os gráficos 2, 3 e 4, representam os resultados das análises granulométricas realizadas em triplicata em amostra de solo da Formação Rio Claro.

Os resultados dos ensaios de granulometria indicaram que as amostras analisadas apresentam classificação textural de Areia argilosa, condizente com o determinado por Oliva *et al* (2005).

- **Amostra G-01**

Tabela 5 – Dados para Classificação Granulométrica – Amostra G-01					
Denominação	Intervalo Tamiz		% que Passa		% Participação.
Pedregulho G	> 4.8	4,800	100,0	95,9	4,1
Pedregulho F	4,800	2,000	95,9	94,8	1,1
Areia Grossa	2,000	0,600	94,8	92,7	2,1
Areia Média	0,600	0,200	92,7	68,0	24,7
Areia Fina	0,200	0,060	68,0	34,0	34,0
Silte	0,060	0,002	34,0	22,0	12,0
Argila	0,002	<0.002	22,0	0,0	22,0
Total					100,0

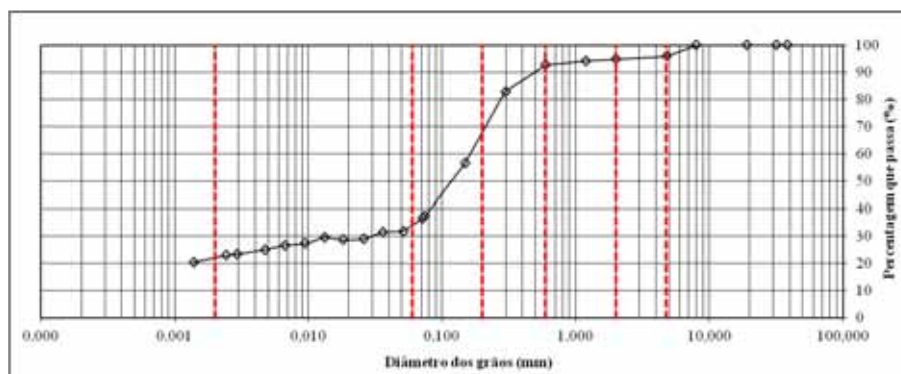


Gráfico 2 – Distribuição das dimensões dos grãos que passam – Amostra G-01

- **Amostra G-02**

Tabela 6 – Dados para Classificação Granulométrica – Amostra G-02					
Denominação	Intervalo Tamiz		% que Passa		% Participação
Pedregulho G	> 4.8	4,800	100,0	96,0	4,0
Pedregulho F	4,800	2,000	96,0	94,2	1,8
Areia Grossa	2,000	0,600	94,2	91,7	2,5
Areia Média	0,600	0,200	91,7	66,0	25,7
Areia Fina	0,200	0,060	66,0	34,0	32,0
Silte	0,060	0,002	34,0	21,0	13,0
Argila	0,002	<0.002	21,0	0,0	21,0
Total					100,0

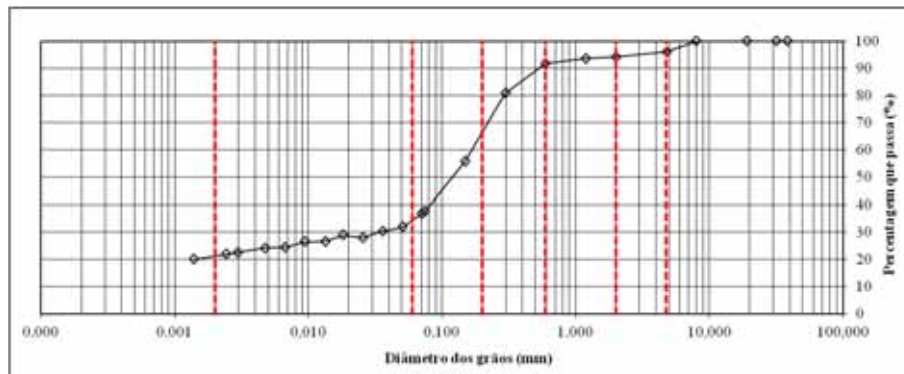


Gráfico 3 – Distribuição das dimensões dos grãos que passam – Amostra G-02

- **Amostra G-3**

Tabela 7 – Dados para Classificação Granulométrica – Amostra G-03					
	Intervalo Tamiz		% que Passa		% Participação
Pedregulho G	> 4.8	4,800	100,0	96,1	3,9
Pedregulho F	4,800	2,000	96,1	95,0	1,2
Areia Grossa	2,000	0,600	95,0	92,5	2,5
Areia Média	0,600	0,200	92,5	75,0	17,5
Areia Fina	0,200	0,060	75,0	35,0	40,0
Silte	0,060	0,002	35,0	21,5	13,5
Argila	0,002	<0.002	21,5	0,0	21,5
Total					100,0

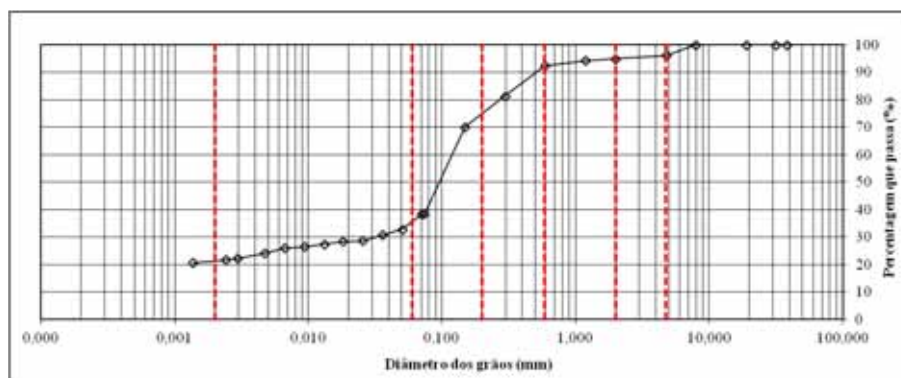


Gráfico 4 – Distribuição das dimensões dos grãos que passam – Amostra G-03

Em relação aos ensaios para determinação da densidade dos grãos do solo estudado, estes apresentaram os seguintes resultados $2,663 \text{ g/cm}^3$, $2,667 \text{ g/cm}^3$, $2,695 \text{ g/cm}^3$, respectivamente para as amostras ME-I, ME-II e ME-III.

Os resultados dos ensaios para a determinação da densidade do solo seco indicaram valores entre $1,39 \text{ g/cm}^3$ (ME-III) e $1,50 \text{ g/cm}^3$ (ME-X).

5.2. Difração de Raios-X

As figuras 23, 24 e 25 apresentam os difratogramas obtidos em análises de difração de Raios-X realizadas na amostra de solo coletada da Formação Rio Claro.

Os resultados indicam a presença dos minerais Quartzo, Caulinita e Gipsita, concordante com encontrado por Oliva (2006).

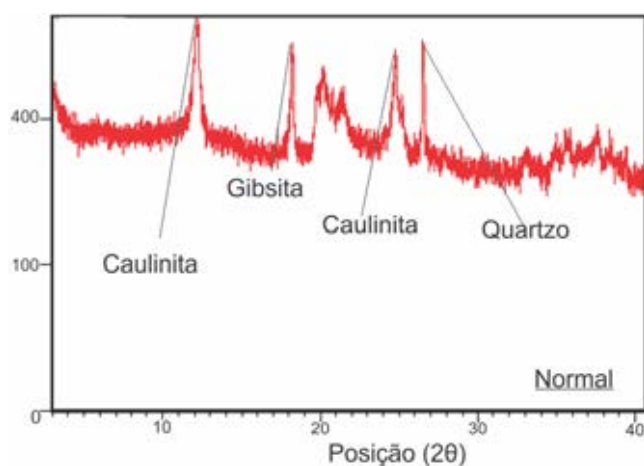


Figura 23 – Difratograma da amostra normal

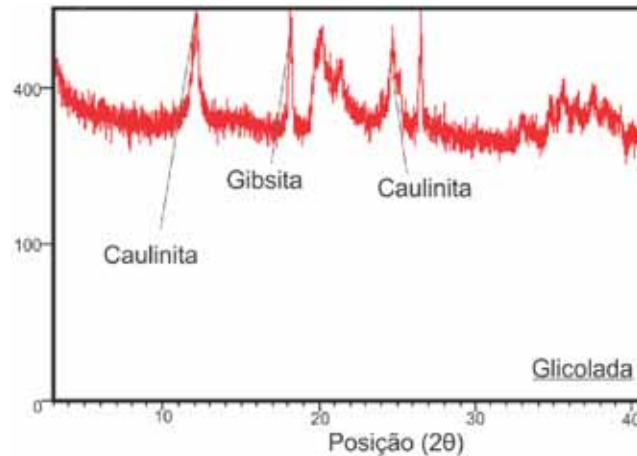


Figura 24 – Difratoograma da amostra preparada com etilenoglicol

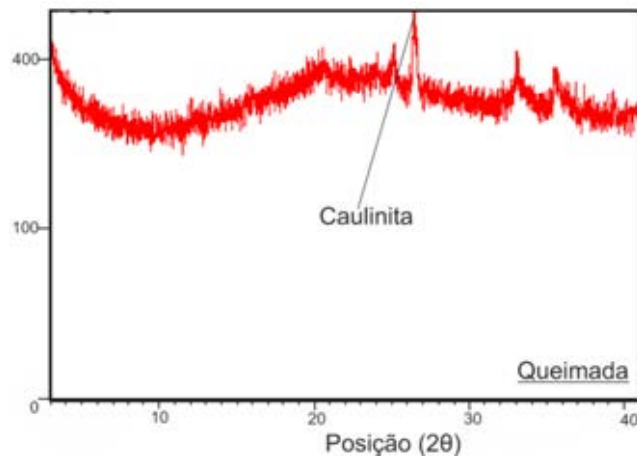


Figura 25 – Difratoograma da amostra aquecida a 550°C

5.3. Tensão Superficial e Tensão Interfacial

Foram determinados os valores da tensão superficial Ar-Água, Ar-Querosene e Ar-Querosene (SUDAN III); e as tensões interfaciais Querosene-Água e Querosene (SUDAN III)-água.

Os resultados, dispostos na **Tabela 12**, indicam que os valores da tensão superficial para Ar-Água estão dentro do esperado, descrito na literatura, para as temperaturas de medição (*CRC Handbook of Chemistry and Physics*, 2009).

Para os resultados com Querosene, não há comparativos para as temperaturas de ensaio realizadas (o mais próximo para o que foi realizado no atual experimento está disposto no site www.etc-cte.ec.gc.ca/databases/Oilproperties/Default.aspx). Sendo assim, e como as

condições de laboratório foram fidelizadas pelos resultados obtidos em Ar-Água, considerou-se que os resultados para as demais determinações são aceitáveis.

Tabela 8 – Tensão superficial e interfacial (Querosene e Água)									
Tensão Superficial (mN/m)						Tensão Interfacial (mN/m)			
Água		Querosene		Querosene+Sudan III		Água+Querosene (Sudan III)		Água+Querosene	
Tensão Superficial	T°C	Tensão Superficial	T°C	Tensão Superficial	T°C	Tensão Interfacial	T°C	Tensão Interfacial	T°C
70,00	26,80	27,80	26,80	27,40	26,80	34,50	26,60	36,50	26,70
70,70	-	27,40	-	27,50	-	34,50	-	36,30	-
70,80	-	27,50	-	27,40	-	34,50	-	36,50	-
71,40	-	27,70	-	27,30	-	34,80	-	36,30	-
71,50	-	27,70	-	27,30	-	34,50	-	36,30	-
72,00	-	27,70	-	27,30	-	34,50	-	36,30	-
71,60	-	27,70	-	27,40	-	34,70	-	36,20	-
72,00	-	27,80	-	27,30	-	34,70	-	36,30	-
72,40	-	27,00	-	27,10	-	34,70	-	36,20	-
72,90	-	27,30	-	27,30	-	34,90	-	36,20	-
72,10	27,40	27,80	27,20	27,30	28,00	34,90	27,00	36,40	27,20
Valores médios									
71,58	27,10	27,58	27,00	27,33	27,40	34,65	26,80	36,32	26,95

(-) – valor não obtido.

Ferreira (2003) obteve valor próximo ao encontrado no atual trabalho para a tensão superficial da água (72,6 mN/m). A pequena diferença pode estar correlacionado à determinações obtidas em diferentes temperaturas.

Em relação à presença do corante orgânico SUDAN III, este não modificou significativamente a tensão superficial do Ar-Querosene, quando comparado com a medição realizada com Querosene sem corante.

Mas a tensão superficial entre Querosene-Água apresentou variação (4,50 %) quando comparados os resultados com e sem o corante SUDAN III, indicando uma possível influência do corante nas forças de atração molecular, nesta relação líquido-líquido.

Para os demais cálculos realizados para os ajustes das curvas de saturação, foram considerados os valores médios de 71,58 mN/m para a tensão superficial Ar-Água, e 27,58 mN/m para a tensão superficial Ar-Querosene.

5.4. Curva de Saturação – Sistema Ar-Água

Neste capítulo serão discutidos os resultados encontrados nos ensaios para determinação das curvas de saturação para o sistema Ar-Água, além da obtenção da curva para o sistema Ar-Óleo de maneira indireta.

5.4.1. Método do Funil de Placa Porosa

A **Tabela 13** apresenta as pressões capilares empregadas e os correspondentes teores de umidade, para os testes realizados no funil de placa porosa para as amostras III, VII, X e XI.

Todas as amostras analisadas apresentaram deslocamento na trajetória, como pode ser verificado no **Gráfico 5**.

Tabela 9 – Pressão Capilar versus Umidade Volumétrica				
h_{aw} (cm)	III	VII	X	XI
	θ_w (cm ³ /cm ³)	θ_w (cm ³ /cm ³)	θ_w (cm ³ /cm ³)	θ_w (cm ³ /cm ³)
0,1*	0,387	0,409	0,415	0,403
5	0,379	0,395	0,400	0,374
10	0,376	0,394	0,397	0,364
15	0,376	0,391	0,343	0,324
20	0,343	0,349	0,339	0,320
25	0,340	0,345	0,336	0,317
30	0,336	0,341	0,333	0,312
35	0,330	0,336	0,329	0,308
40	0,324	0,332	0,326	0,304

* - valor hipotético, utilizado apenas para incluir os dados do solo saturado.

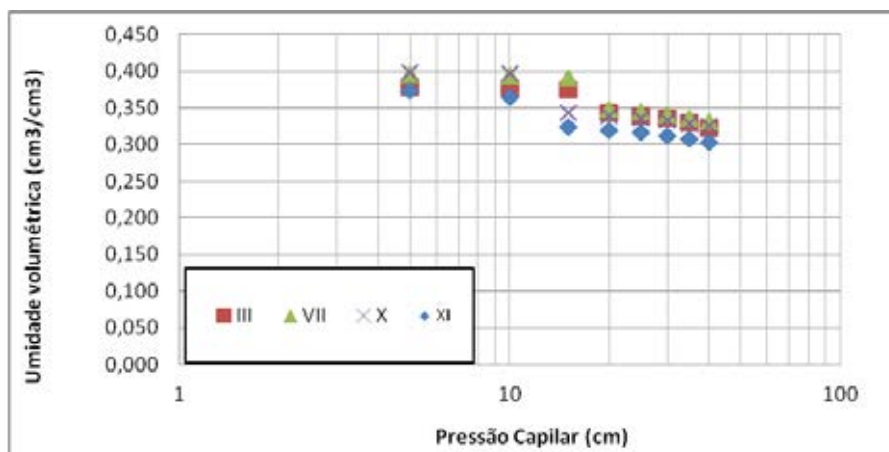


Gráfico 5 – Pressão Capilar versus Umidade Volumétrica – relação entre amostras

As amostras III e VII apresentam uma mudança no padrão de pressão capilar entre as pressões 15 kPa e 20 kPa, indicando um possível comportamento bimodal na distribuição dos poros do solo, conforme discutido por Durner (1992, 1994 e 1997).

Já para as amostras X e XI, esta mudança no padrão de comportamento frente à pressão aplicada, ocorre entre as pressões capilares 10 kPa e 15 kPa.

5.4.2. Método da Câmara de Pressão – Câmara de Richards

A variação da umidade volumétrica frente à pressão aplicada às câmaras de pressão é apresentada na **Tabela 14** e no **Gráfico 6**.

Tabela 10 – Pressão Capilar versus Umidade Volumétrica			
Pressão (cm)	IV	V	VIII
	θ (cm ³ /cm ³)	θ (cm ³ /cm ³)	θ (cm ³ /cm ³)
50	0,292	0,300	0,297
100	0,259	0,263	0,262
200	0,224	0,231	0,232
500	0,191	0,200	0,202
1000	0,170	0,178	0,180
2000	0,160	0,168	0,170
4000	0,149	0,158	0,162

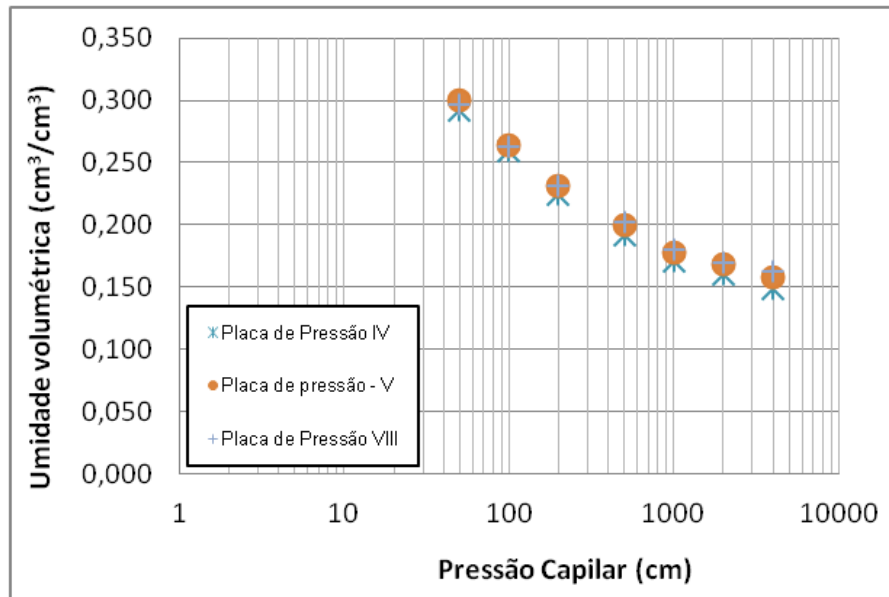


Gráfico 6 – Pressão Capilar versus Umidade Volumétrica – relação entre amostras

Dos resultados pode-se observar que todas as amostras analisadas na Câmara de Pressão apresentaram comportamentos similares, mostrando valores de umidade próximos frente às pressões aplicadas.

Ao unir os dados (**Tabelas 13 e 14**) dos ensaios realizados nas placas de sucção com os dados determinados nas câmaras de pressão, nota-se que estas apresentam coerência e continuidade na resposta da umidade volumétrica frente ao aumento da pressão capilar, tal como mostrado no **Gráfico 7**.

Trabalhos tais como Soto e Chang (2008) tem mostrado que estes solos ainda apresentam mudanças de trajetória para maiores valores de pressão capilar (em torno dos 10^3 cm e 10^6 cm), o que é típico de curvas de pressão multimodais quando provenientes de solos tropicais.

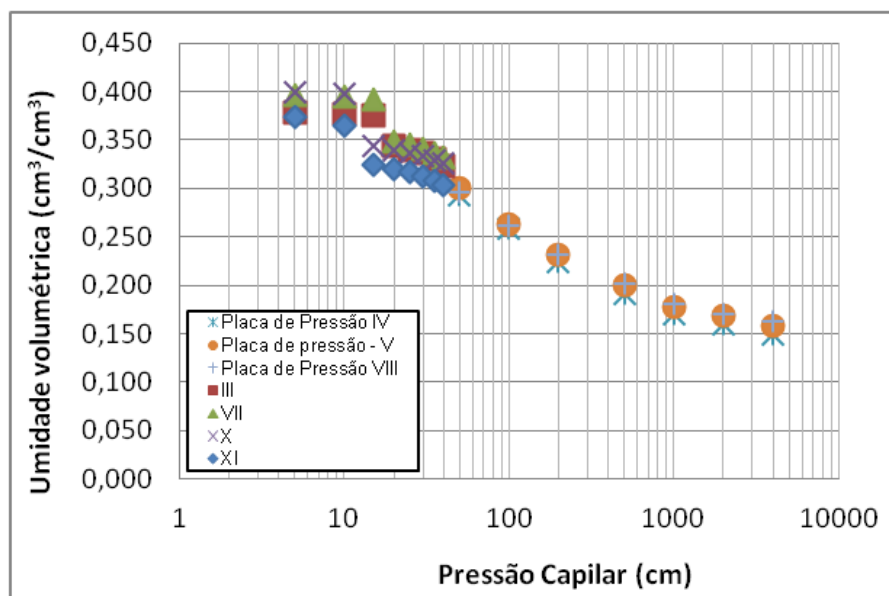


Gráfico 7 – Resultados provenientes dos testes de Funil e Câmara de Richards

5.4.3. Ajustes Unimodais e Bimodais para curvas provenientes dos testes do Funil de Placa Porosa – Sistema Ar-Água

Por intermédio do software RETC v. 6.02, foram obtidos os parâmetros necessários ao ajuste dos dados experimentais aos modelos de distribuição do tamanho dos poros, uni e bimodais, conforme ilustrado na **Tabela 15** e nos **Gráficos 8, 9, 10 e 11**.

Tabela 11 – Parâmetros de ajuste de curvas – Unimodal e Bimodal					
Ajuste	Parâmetros	Amostra			
		III	VII	X	XI
Unimodal	θ_s	0,3816	0,3997	0,4081	0,4016
	θ_r	0,3298	0,3375	0,3316	0,2833
	α	0,0559	0,0576	0,0830	0,1426
	n	7,6027	10,5505	7,6180	1,9913
	m	0,8685	0,9052	0,8687	0,4978
	R^2	0,9619	0,9708	0,9792	0,9697
Bimodal	θ_s	0,3786	0,3952	0,4014	0,3737
	θ_r	0,0587	0,3058	0,3048	0,2955
	w_1	0,0960	0,4725	0,5052	0,6594
	α_1	0,0619	0,0627	0,0799	0,0888
	n_1	49,9200	49,9920	48,3630	12,0490
	m_1	0,9800	0,9800	0,9793	0,9170
	α_2	0,0115	0,0275	0,0469	0,0318
	n_2	2,3607	3,2665	2,0218	4,9769
	m_2	0,5764	0,6939	0,5054	0,7991
	R^2	0,999	0,999	0,999	0,999

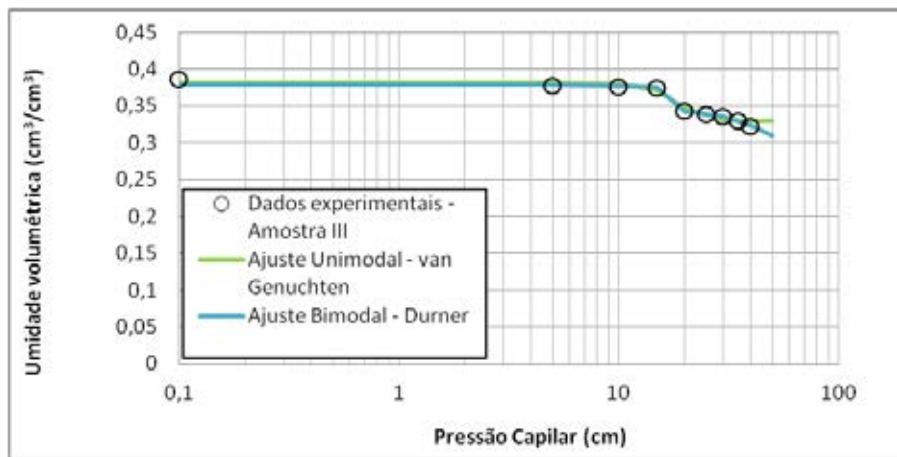


Gráfico 8 – Ajuste Unimodal e Bimodal – Amostra III

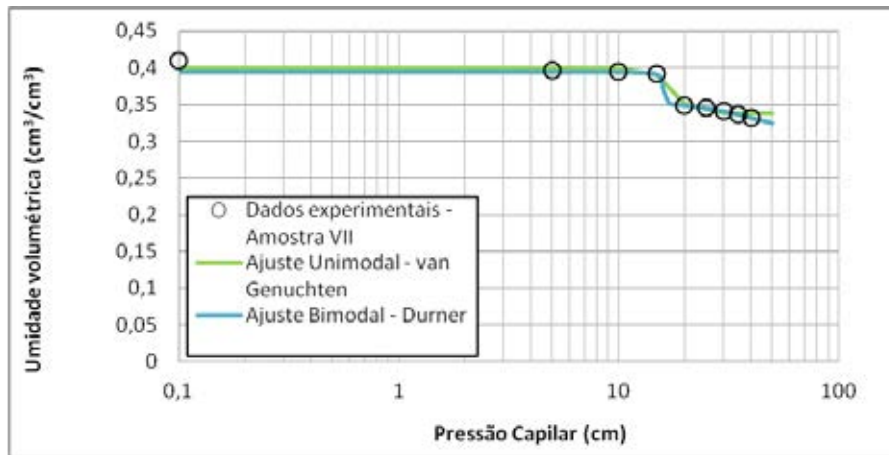


Gráfico 9- Ajuste Unimodal e Bimodal – Amostra VII

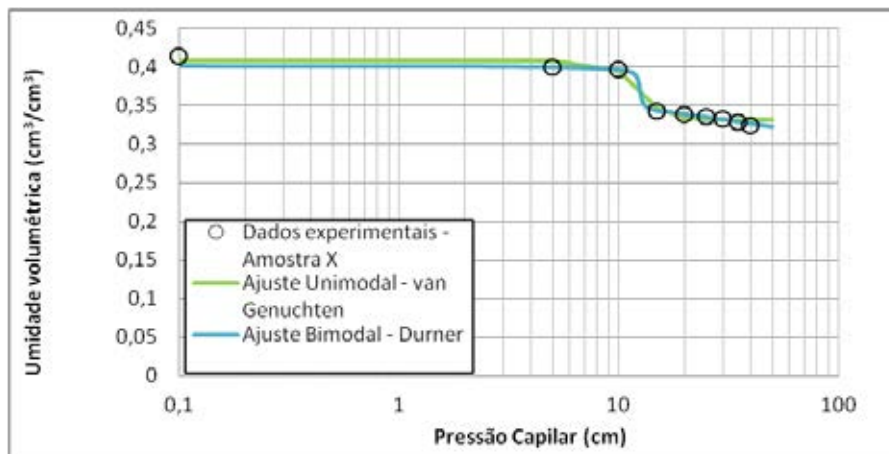


Gráfico 10 – Ajuste Unimodal e Bimodal – Amostra X

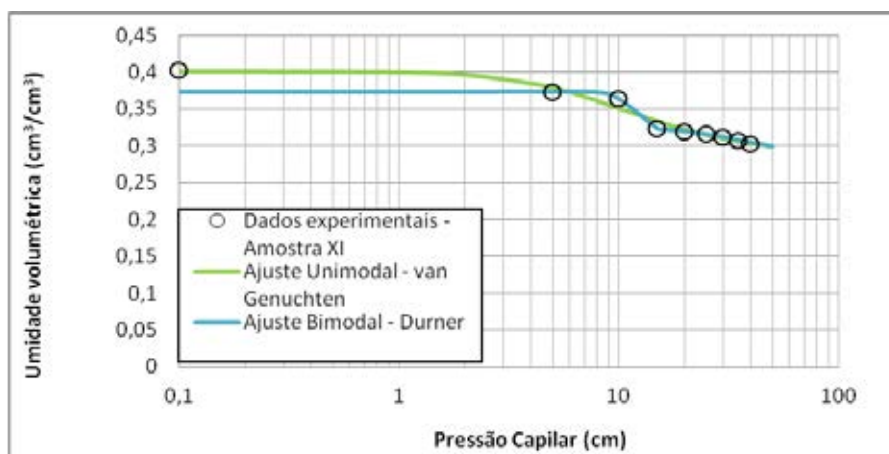


Gráfico 11 – Ajuste Unimodal e Bimodal – Amostra XI

Os resultados de R^2 , provenientes do modelo bimodal (Durner, 1992), com valores muito próximos a 1, indicam melhor aderência das curvas de ajuste aos dados experimentais, conforme também verificado por Soto e Chang (2013), em diversas amostras coletadas no interior do Estado de São Paulo.

Segundo Soto (2008), muitos solos brasileiros, ou seja, bem desenvolvidos e maduros, podem apresentar um comportamento multimodal na distribuição do tamanho dos poros.

A semelhança do comportamento das curvas das amostras III e VII e entre as amostras X e XI podem estar relacionadas ao parâmetro α , semelhante para cada par mencionado. No caso das duas primeiras amostras, estas traduzem valores menores para este parâmetro, indicando que provavelmente apresentaram menores tamanhos de poros nos intervalos das pressões avaliadas, o que necessitou de um incremento de pressão (de 15 kPa para 20 kPa) para ilustrarem o escalonamento em suas curvas (gráficos 8 e 9).

5.5. Curva de Saturação – Sistema Ar-Querosene

A variação da umidade volumétrica de Querosene defronte à variação da pressão capilar exercida, durante a execução dos testes para as amostras XIV, XXV, XXVI e XXVII, pode ser verificada na **Tabela 16** e no **Gráfico 12**.

Adicionalmente o **Gráfico 13** mostra um comparativo entre os resultados provenientes das curvas de saturação para sistemas Ar-Água e Ar-Querosene.

Tabela 12 – Pressão Capilar versus Umidade Volumétrica (Ar-Querosene)				
h_{ao}	XIV	XXV	XXVI	XXVII
	θ_o (cm ³ /cm ³)	θ_o (cm ³ /cm ³)	θ_o (cm ³ /cm ³)	θ_o (cm ³ /cm ³)
0,1	0,317	0,321	0,331	0,336
5	0,310	0,312	0,322	0,335
10	0,293	0,296	0,321	0,334
15	0,266	0,262	0,320	0,284
20	0,262	0,255	0,289	0,265
25	0,253	0,247	0,263	0,255
30	0,244	0,234	0,253	0,248
35	0,235	0,227	0,245	0,239
40	0,226	0,218	0,238	0,231
45	0,216	0,209	0,229	0,222
50	0,207	0,201	0,223	0,212

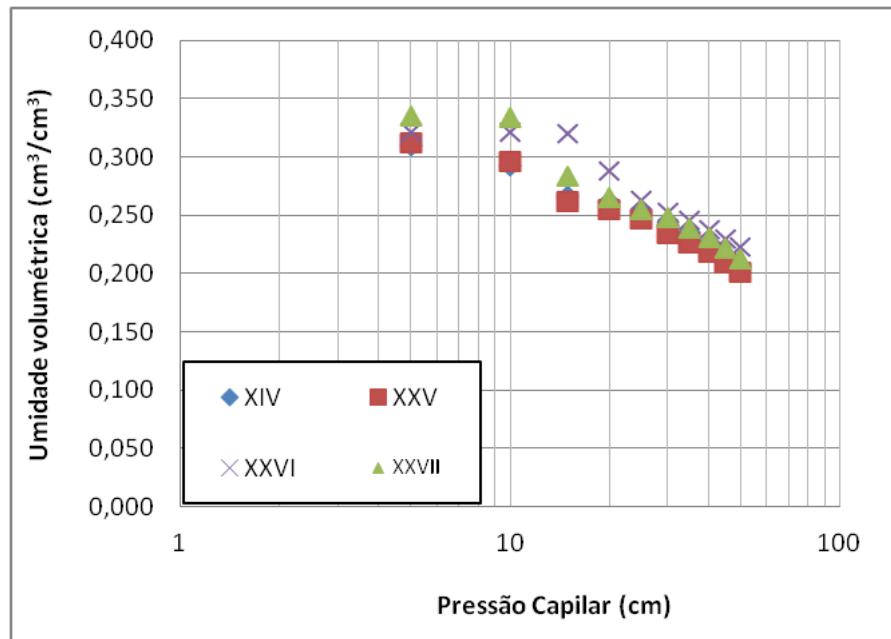


Gráfico 12 – Pressão Capilar versus Umidade Volumétrica – relação entre amostras – Sistema Ar-Querosene

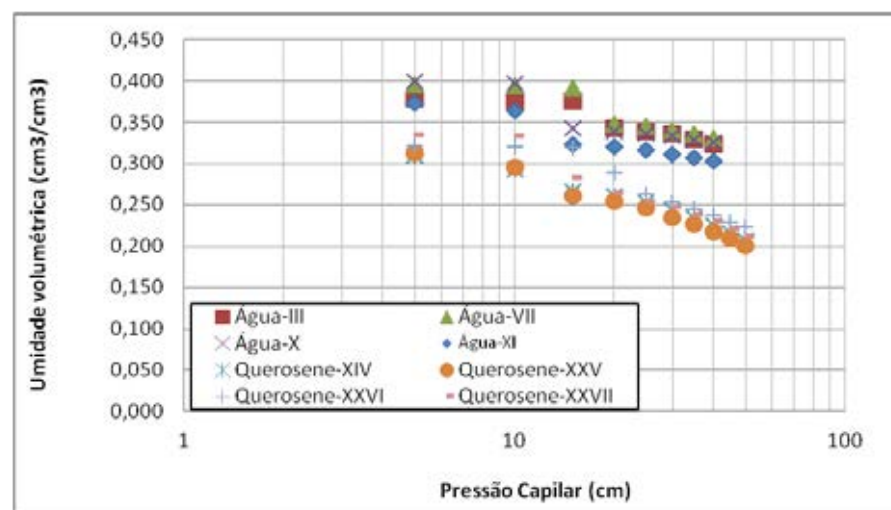


Gráfico 13 – Comparativo entre os resultados medidos nos sistemas Ar-Água e Ar-Querosene

De maneira análoga ao ocorrido nos ensaios envolvendo o sistema Ar-Água, as amostras analisadas para o sistema Ar-Querosene apresentaram mudança de comportamento entre as pressões de 5 kpa e 20 kpa.

Ao compararmos os resultados obtidos entre os dois sistemas (**Gráfico 13**), verifica-se o deslocamento vertical das curvas, ou seja, as curvas envolvendo o sistema Ar-Água apresentaram maior teor volumétrico quando relacionado às curvas do sistema Ar-Querosene.

Estes resultados são coerentes se levarmos em consideração que a água tem mais atração intermolecular com o solo (mais molhante) em relação ao

Querosene. Isto pode ser observado quando a tensão superficial da água (71,58 mN/m, Tabela 12) é superior ao do Querosene (27,58 mN/m, Tabela 12) em aproximadamente 2,6 vezes. Conseqüentemente, este fato implicará um teor volumétrico de água maior que o óleo para um mesmo valor de pressão capilar.

5.5.1. Ajustes Unimodais e Bimodais para curvas provenientes dos testes do Funil de Placa Porosa – Sistema Ar-Querosene

A **Tabela 17** apresenta os parâmetros de ajustes obtidos para os respectivos ajustes das curvas de saturação.

Conforme observado nos ensaios relacionados ao sistema Ar-Querosene, ilustrados nos **Gráficos 14 a 17**, verifica-se o escalonamento de todas as curvas obtidas para os dados experimentais e, por conseguinte, a imprecisão no ajuste dessas curvas aos modelos unimodais, e adequação do ajuste utilizando-se o modelo multimodal.

Tabela 13 – Parâmetros de ajuste de curvas – Unimodal e Bimodal					
Ajuste	Parâmetros	Amostra			
		XIX	XXV	XXVI	XXVII
Unimodal	θ_s	0,3185	0,3227	0,3270	0,3398
	θ_r	0,0000	0,1080	0,2211	0,2056
	α	0,0526	0,0678	0,0462	0,0640
	n	1,3625	1,6163	4,3234	2,8766
	m	0,2660	0,3813	0,7687	0,6524
	R^2	0,9884	0,9895	0,9890	0,9766
Bimodal	θ_s	0,3102	0,3124	0,3219	0,3363
	θ_r	0,1511	0,1448	0,1963	0,0849
	w_1	0,2496	0,2567	0,4276	0,2397
	α_1	0,0993	0,0986	0,0511	0,0718
	n_1	49,9740	49,9930	13,5710	16,6440
	m_1	0,9170	0,9710	0,9263	0,9399
	α_2	0,0254	0,0282	0,0258	0,0204
	n_2	3,0164	2,6685	3,9783	2,2985
	m_2	0,7991	0,6253	0,7486	0,5649
	R^2	0,9990	0,9990	0,9990	0,9990

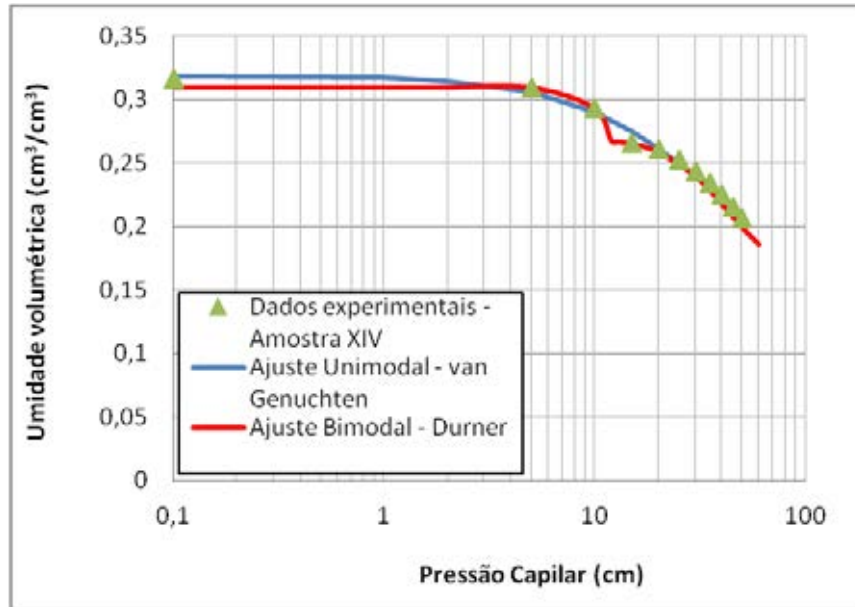


Gráfico 14 – Ajuste Unimodal e Bimodal – Amostra XIV

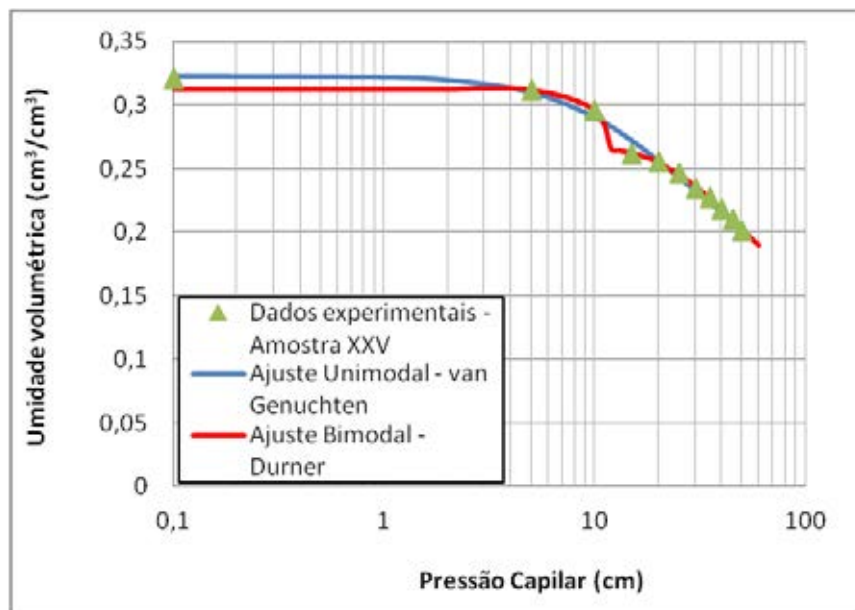


Gráfico 15 – Ajuste Unimodal e Bimodal – Amostra XXV

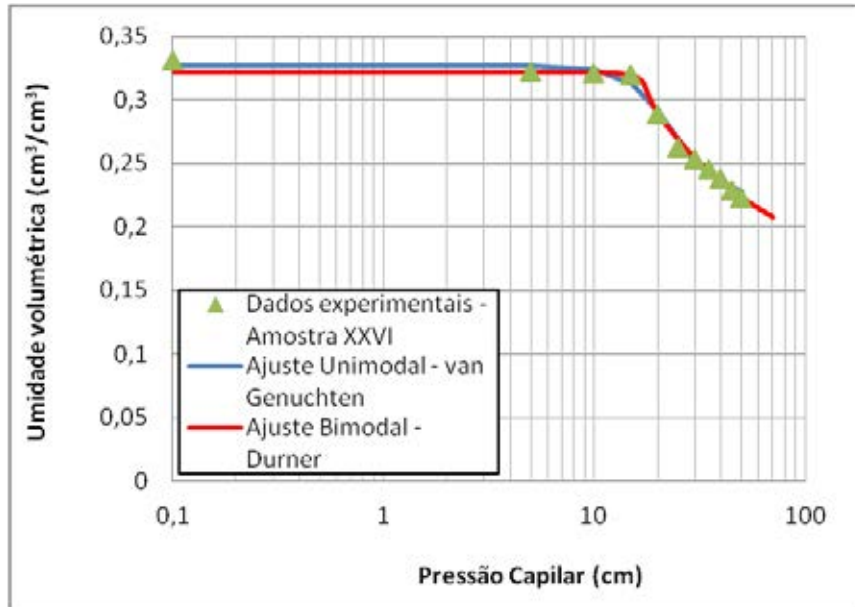


Gráfico 16 – Ajuste Unimodal e Bimodal – Amostra XXVI

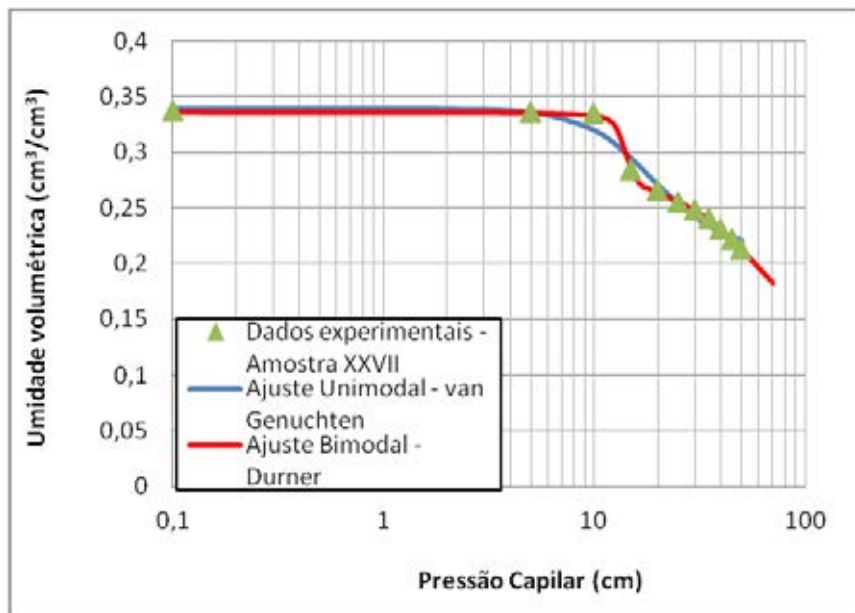


Gráfico 17 – Ajuste Unimodal e Bimodal – Amostra XXVII

Analisando-se os ajustes das curvas de saturação aos modelos de distribuição dos tamanhos dos poros, van Genuchten e Durner, é nítida a melhor adequação do modelo bimodal às amostras analisadas.

Para três das amostras estudadas (XIV, XXV e XXVII), o escalonamento principal ocorre durante a passagem da pressão de 10 kPa para 15 kPa, como ocorrido para as amostras III e VII do sistema Ar-Água. Já o escalonamento apresentado na amostra XXVI foi semelhante ao proporcionado pelas amostras X e XI do sistema Ar-Água, ou seja, da mudança de pressão de

15 kPa para 20 kPa.

Esta semelhança entre algumas das amostras, independentemente do tipo de sistema envolvido, é característico do arranjo dos poros do solo avaliado. Assim como ocorrido no sistema Ar-Água, o tamanho dos poros determinou o escalonamento das curvas também no sistema Ar-Querosene, com valores maiores do parâmetro α para as amostras XIV, XXV e XXVII e menor para a amostra XXVI, fazendo com que esta última apresentasse necessidade de um incremento maior na pressão para apresentar o escalonamento na curva.

Também como apresentado nas amostras do sistema Ar-Água, as amostras do sistema Ar-Querosene apresentam R^2 praticamente igual a 1, indicando maior encaixe das curvas ao modelo bimodal de distribuição dos tamanhos dos poros.

A semelhança no comportamento bimodal do solo estudado, independentemente do sistema avaliado (Ar-Água ou Ar-Querosene), indica que este não pode ser influenciado pelo fluido adotado, ou seja, este comportamento independe das características físicas e químicas do fluido empregado no sistema, mas depende simplesmente da estruturação e granulometria deste solo.

Os valores de teor de umidade residual maiores no sistema Ar-Água que no sistema Ar-Querosene indicam uma maior afinidade do meio poroso com a água.

A presença de solos com comportamento multimodal pode estar relacionada diretamente à mobilidade dos fluidos dentro do meio poroso em questão, influenciando assim, em casos de remediação de áreas impactadas por LNAPL, na recuperação de produto em fase livre. Trabalhos como os realizados por Soto e Chang (2013 e 2014, no prelo) mostram a grande influência da multimodalidade dos tamanhos dos poros no solo, nos resultados da permeabilidade relativa de sistema ar-água e na determinação de volumes recuperáveis em águas subterrâneas contaminadas por fase livre de derivados de petróleo.

5.5.2. Obtenção de curvas de saturação Ar-Querosene por métodos indiretos

Dada a dificuldade experimental em se realizar ensaios diretos envolvendo curvas de saturação para LNAPL, e a necessidade de obtenção dessas informações na utilização de modelos de recuperação e remediação de áreas impactadas por fase livre, alguns modelos teóricos foram desenvolvidos para a obtenção destes valores por métodos indiretos, como os descritos por Lenhard e Parker e Charbeneau, já discutidos previamente.

A **Tabela 18** apresenta os parâmetros obtidos para a determinação indireta da curva de saturação para Ar-Querosene baseado no modelo de Lenhard e Parker, a partir dos dados da curva de saturação para Ar-Água.

Tabela 14 – Parâmetros de obtenção das curvas pelo método indireto – Lenhard e Parker				
Pressão Capilar	Amostra III	Amostra VII	Amostra X	Amostra XI
	θ_o	θ_o	θ_o	θ_o
hao	(cm ³ /cm ³)	(cm ³ /cm ³)	(cm ³ /cm ³)	(cm ³ /cm ³)
0,04	0,311	0,329	0,333	0,324
1,93	0,304	0,318	0,321	0,300
3,85	0,303	0,317	0,319	0,293
5,78	0,302	0,315	0,276	0,260
7,71	0,276	0,280	0,272	0,257
9,63	0,273	0,278	0,270	0,255
11,56	0,270	0,274	0,268	0,251
13,49	0,265	0,270	0,265	0,247
15,41	0,260	0,267	0,262	0,244

Como ilustrado no **Gráfico 18**, nota-se que as curvas obtidas de maneira direta (amostras XIV, XXV, XXVI e XXVII) não são coincidentes com as curvas determinadas de maneira indireta (Equações 28 e 29) a partir dos dados das curvas de saturação Ar-Água (amostras III, VII, X e XI), o que é devido a diferença de densidade dos fluidos envolvidos em cada sistema. Uma hipótese outra hipótese contempla a umidade inicial do solo, que pode ter influenciado no comportamento e distribuição das curvas.

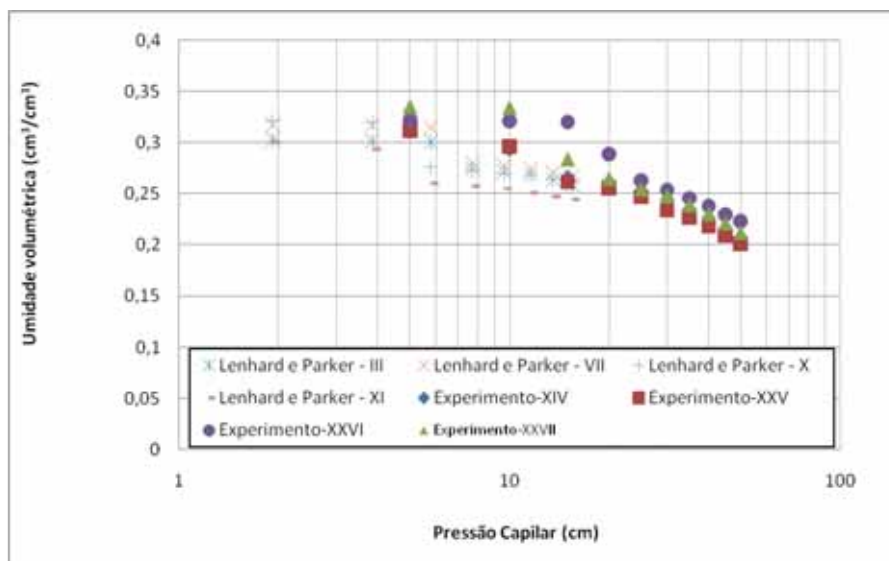


Gráfico 18 – Comparativo entre Dados Experimentais (Ar-Óleo) e método indireto (Ar-Água)

A **Tabela 19** apresenta os parâmetros de ajuste (sistema Ar-Água) para obtenção indireta das curvas de saturação para o sistema Ar-Querosene, a partir do modelo utilizado por Charbeneau (API, 2007).

Tabela 15 - Parâmetros de obtenção das curvas pelo método indireto – Charbeneau				
Parâmetros	Amostra			
	III	VII	X	XI
θ_s	0,3816	0,3997	0,4081	0,4016
θ_r	0,3298	0,3375	0,3316	0,2833
α	0,0559	0,0576	0,0830	0,1426
n	7,6027	10,5505	7,6180	1,9913
m	0,8685	0,9052	0,8687	0,4978
α_{ao}	0,1452	0,1494	0,2153	0,3699

Os **Gráficos 19 a 22** ilustram as curvas obtidas pelos diferentes modelos utilizados para a obtenção indireta das curvas de saturação para Ar-Querosene. Todas as curvas (obtidas indiretamente) foram comparadas entre si e com a determinada diretamente por intermédio dos dados experimentais para o sistema Ar-Querosene.

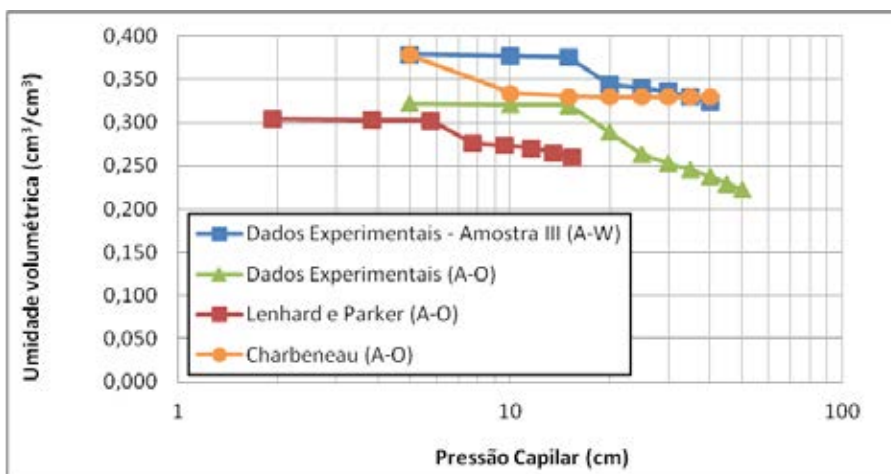


Gráfico 19 – Comparação entre métodos indiretos e diretos – Amostra III

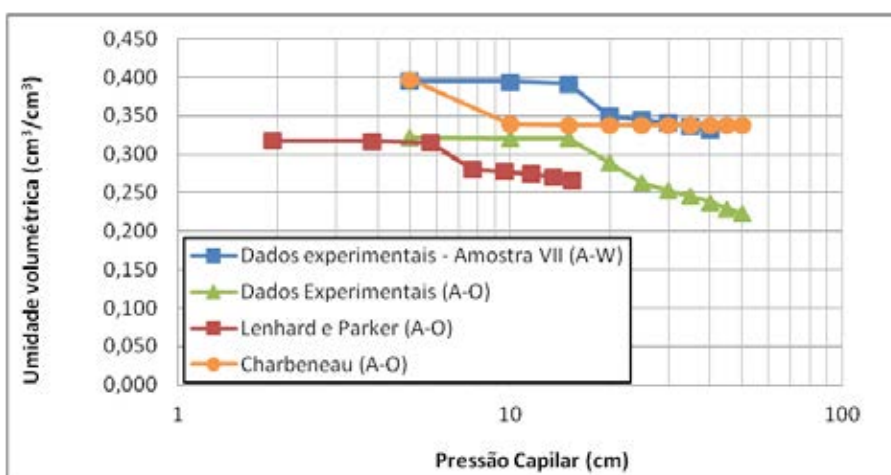


Gráfico 20 – Comparação entre métodos indiretos e diretos – Amostra VII

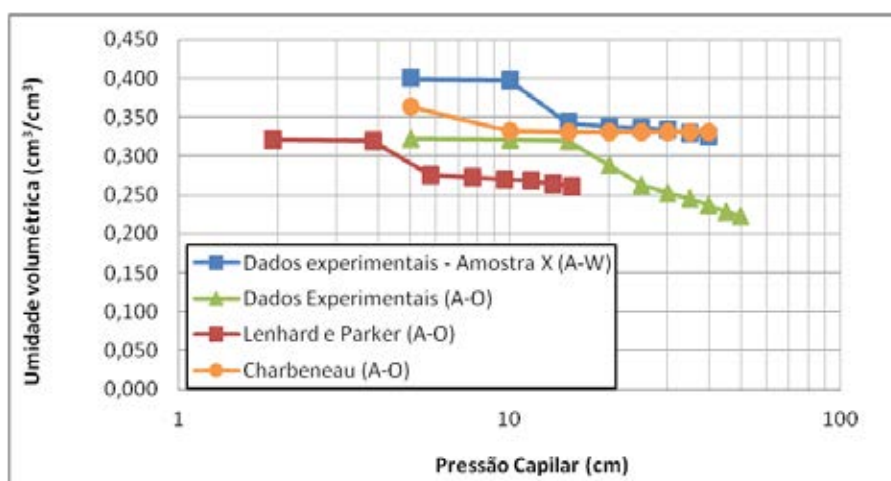


Gráfico 21 – Comparação entre métodos indiretos e diretos – Amostra X

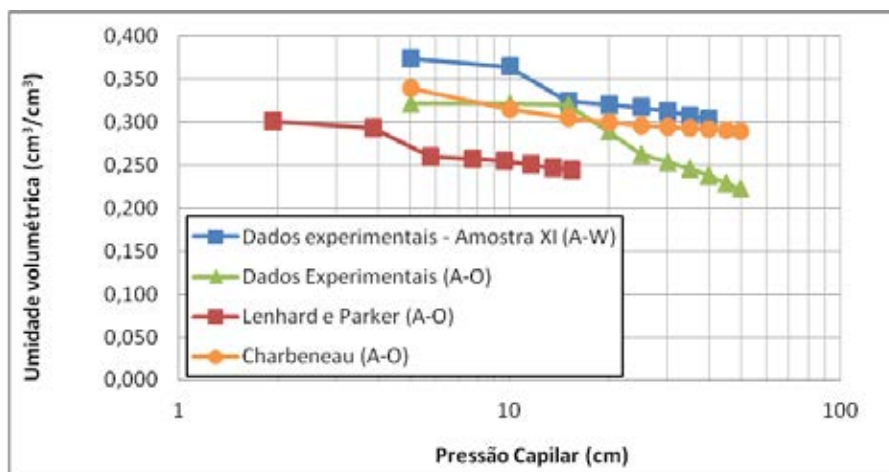


Gráfico 22 – Comparação entre métodos indiretos e diretos – Amostra XI

A primeira observação que pode ser retirada ao confrontar as curvas de saturação obtidas indiretamente com as curvas determinadas experimentalmente é que elas não são coincidentes.

Os modelos utilizados apresentaram maiores deslocamentos em relação à curva ensaiada, o que, conseqüentemente, implicaria em erros de estimativa a partir dos diferentes modelos (condutividade hidráulica do óleo, permeabilidade relativa, volumes recuperáveis de LNAPL em água subterrâneas contaminadas, etc) que se valem da curva de pressão capilar de sistemas Ar-Água para essas determinações.

Como exemplo, o software LDRM (*LNAPL Distribution and Recovery Model*), desenvolvido pela API baseia-se no modelo proposto por Charbeneau (2007) para determinação dos volumes recuperáveis de fase livre em água subterrânea contaminada. Conseqüentemente a sua estimativa indireta a partir de curvas de saturação para solo não saturado (ou interfaces Ar-Água) poderá comprometer os resultados e adicionalmente as estimativas de recuperação por métodos tradicionais, os mesmos que estão contidos no software da API (2007).

A **Tabela 20** e o **Gráfico 23** apresentam uma avaliação realizada utilizando-se a média dos valores obtidos nas amostras analisadas no sistema Ar-Óleo, e também dos modelos indiretos de Lenhard e Parker e Charbeneau.

Dos modelos adotados no atual trabalho, Lenhard e Parker obtêm a pressão capilar do óleo (h_o) por intermédio da pressão capilar da água (h_a), por maneira indireta, aplicando-se a **Equação 28**. Ao cancelarmos a correção feita à pressão capilar da água para a obtenção da pressão capilar do óleo no modelo proposto por Lenhard e Parker, este torna-se muito próximo aos dados

experimentais, como pode ser visto no **Gráfico 23**.

Tabela 16 – Comparativo entre as médias (θ_o)					
Método Direto	Lenhard e Parker		Charbeneau		
Média	Pressão Sem correção (cm)	Pressão Com Correção (cm)	Média	Pressão Sem correção (cm)	Média
θ_o (cm ³ /cm ³)			θ_o (cm ³ /cm ³)		θ_o (cm ³ /cm ³)
0,326	0,1	0,04	0,324	0,1	0,398
0,320	5	1,93	0,311	5	0,380
0,311	10	3,85	0,308	10	0,337
0,283	15	5,78	0,288	15	0,327
0,268	20	7,71	0,271	20	0,326
0,254	25	9,63	0,269	25	0,325
0,245	30	11,56	0,265	30	0,324
0,237	35	13,49	0,262	35	0,323
0,228	40	15,41	0,258	40	0,323

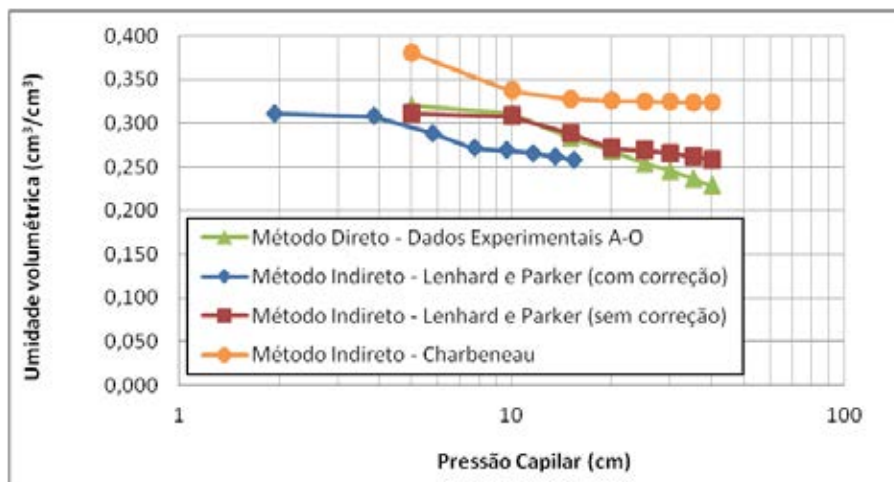


Gráfico 23 – Médias obtidas para o sistema direto e para o sistema indireto (A-O)

Embora possa parecer uma solução aplicável e de menor erro associado ao cálculo de contaminantes em fase livre presentes no meio poroso, a aplicação de Lenhard e Parker sem a correção da pressão (h_a) por intermédio da relação com a tensão interfacial dos fluidos envolvidos, pode acarretar em erro por considerar a relação existente para a água como sendo idêntica a do Querosene.

5.6. Curva de saturação – Sistema Querosene-Água

Dos testes realizados em diferentes sistemas este foi o único em que não foi possível a conclusão dos ensaios laboratoriais.

Os testes realizados para o sistema Querosene-Água levantaram a hipótese de que não houve obtenção da estanqueidade necessária do sistema para a completa realização dos ensaios.

Neste caso fica a recomendação para trabalhos futuros avaliarem outras formas de estanqueidade do sistema, garantindo assim a eliminação do ar e da interferência entre os fluidos envolvidos no ensaio.

6. CONCLUSÕES

Foram apresentados aspectos do comportamento das curvas de saturação da água e LNAPL, quando utilizados solos representativos da Formação Rio Claro.

Os métodos experimentais levaram em consideração testes consagrados para solos não saturados e fluxo multifásico, com a finalidade de testar-se a obtenção direta e indireta de curvas de saturação para sistemas Ar-LNAPL e LNAPL-Água, utilizadas em diversos modelos destinados à caracterização de fluxo multifásico e remediação de áreas contaminadas com LNAPL.

Os resultados experimentais de sistemas Ar-água e Ar-óleo mostraram que são necessários para o ajuste de curvas de saturação modelos que levem em consideração a distribuição bimodal de poros para o solo estudado. Ainda, se pressupõe que, a natureza destes solos seja multimodal como apontado por Soto e Chang (2008, 2013), pois os ensaios tiveram como pressão capilar limite igual a 400kPa.

A semelhança das curvas de pressão capilar, com características bimodais provenientes dos sistemas Ar-Água e Ar-Querosene, indica que este comportamento independe das características físicas e químicas do fluido empregado no sistema, mas depende simplesmente da estrutura deste solo.

Por outro lado, a obtenção indireta de curvas de saturação Ar-Querosene, indica que os modelos propostos por Lenhard e Parker (1987) e Charbeneau (API, 2007) apresentam diferença nas trajetórias das curvas quando comparados entre si e entre os dados obtidos experimentalmente. A diferença pode estar associada às características intrínsecas de solos tropicais e que podem interferir na relação de tensões superficiais, porém ainda são necessários estudos para determinar as causas deste comportamento. No entanto, pode-se inferir que, se este comportamento observado for generalizado para a utilização de modelos indiretos para determinação de certas propriedades mecânicas e hidráulicas, passariam a ser comprometidas.

Adicionalmente, considerando-se que em processos de remediação a

determinação do volume recuperável de LNAPL (API, 2007) baseia-se na determinação indireta da curva de saturação para sistema Ar-Óleo, podemos também observar que os prazos e custos para estimativas de remediação possam ser discrepantes quando se trata deste tipo de solos. Para minimizar estes erros associados a solos tropicais seria necessária a adoção de modelos multimodais.

Para trabalhos futuros seria interessante a adoção de um número maior de amostras de solos de diferentes regiões, assim como a melhoria no sistema de estanqueidade do sistema Querosene-Água.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADAMSKI, M., KREMESEC, V., KOLHATKAR, R., PEARSON, C.;ROWAN, B. (2005). LNAPL in finegrained soils: conceptualization of saturation, distribution, recovery, and their modeling. **Ground Water Monitoring & Remediation**, v.25, n.1, p. 100-112.

AHMED, TAREK H. **Reservoir Engineering Handbook**. 4^a ed. Burlington: Gulf Professional Publishing, 2010. 1472 p.

AL-SUHAILI, R. H.; FAISAL, A. A. H.. Two-Phase Capillary Pressure-Saturation Relationship for Kerosene in Iraq Sand. **Jordan Journal Of Civil Engineering**. Irbid, p. 385-393. maio 2012.

ANDERSON, W. G. Wettability Literature Survey – Part 2: Wettability Measurement. **Journal of Petroleum Technology**. SPE, p. 1246-1262. November, 1986.

API Interactive LNAPL Guide, Version 2 (2004). American Petroleum Institute, Washington D.C. (<http://api-ep.api.org/environment/index.cfm>)

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6508: Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm - Determinação da massa específica**. Rio de Janeiro, 1984. 8 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181: Solo – Análise granulométrica –Versão Corrigida: 1988**. Rio de Janeiro, 1984. 13 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13292: Solo - Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares à carga constante - Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 1995. 8 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14545: Solo - Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável.** Rio de Janeiro, 2000. 12 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TEST MATERIALS. **D6836-02:** Standard Test Methods for Determination of the Soil Water Characteristic Curve for Desorption Using a Hanging Column, Pressure Extractor, Chilled Mirror Hygrometer, and/or Centrifuge. West Conshohocken, 2008. 22 p.

BALI, K. M., GRISMER, M. E., AND HOPMANS, J. W.. "Outflow Methods for Evaluating the Soil Hydraulic Functional Relationships Between NAPL Pressure and Saturation in Porous Media," *Volatile Organic Compounds in the Environment, ASTM STP 1261*, W. Wang, J. Schnoor, and J. Doi, Eds., American Society for Testing and Materials, 1996, pp. 105-118.

BEAR, Jacob. **Dynamics of Fluids in Porous Media.** New York: Dover Publications, 1972. 764 p.

BEAR, Jacob. **Hydraulics of Groundwater.** New York: Dover Publications, 1979. 569p.

BEAR, Jacob; CHENG, Alexander H.-d.. **Theory and Applications of Transport in Porous Media: Modeling Groundwater Flow and Contaminant Transport.** New York: Springer, 2010. 850 p. (Volume 23).

BROOKS, R.H., COREY, A.T.: Hydraulic properties of porous medium. Colorado State University (Fort Collins). Hydrology Paper n°3 (1964)

BUCKINGHAM, E. **Studies on the movement of soil moisture.** Bulletin 38. USDA: Bureau Of Soils. Washington, DC, 1907.

BURGER, C. A.; SHACKELFORD, C. D.. Soil-Water Characteristic Curves and Dual Porosity of Sand-Diatomaceous Earth Mixtures. **Journal Of Geotechnical And Geoenvironmental Engineering.** p. 790-800. set. 2001

CÁSSARO, Fabio Augusto Meira et al. Nota: Funil de Haines Modificado: Curvas de Retenção de Solos Próximos à Saturação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p.2555-2562, 2008.

CHARBENEAU, Randall J.. **Groundwater hydraulics and pollutant transport**. Long Grove: Waveland Press, 2006. 593 p.

CHARBENEAU, Randall J.; BEDIANT, Philip B.; LOEHR, Raymond C.. **Groundwater remediation**. vol. 8. Lancaster: Technomic Publishing Co, 1992. 188 p. (Water Quality Management Library).

CHARBENEAU, R.J. LNAPL distribution and recovery model (LDRM). **API Publication Number 4760**, American Petroleum Institute, Washington D.C., 2007.

CHARBENEAU, R.J. (2003). Models for design of free-product recovery systems for petroleum hydrocarbon liquids. **API Publication Number 4729**, American Petroleum Institute, Washington D.C.

CHARBENEAU, R.J., CHIANG, C.Y. (1995). Estimation of free-hydrocarbon recovery from dual-pump systems. **Groundwater**. Vol. 33. No.4. pp. 627-634.

CHARBENEAU, R.J., JOHNS, R.T., LAKE, L.W.; MCADAMS III, M.J. (2000). Free-product recovery of petroleum hydrocarbon liquids. **Groundwater Monitoring&Remediation**. Vol. 20. Is. 3. pp. 147-158.

CHARBENEAU, R.J., WANAKULE, N., CHIANG, C.Y., NEVIN, J.P., KLEIN, C.L. 1989. A two-layer model to simulate floating free product recovery: formulation and applications. In **Proceedings of the Petroleum Hydrocarbons and Organic Chemicals in Ground Water: Prevention, Detection and Restoration Conference**. Dublin, Ohio: National Water Well Association.

CHARBENEAU, R.J.; WEAVER, J.W. 1992. Modeling contaminant transport through subsurface systems. **Journal of Hazardous Materials**. Vol. 32. pp. 293-

311.

DEAN, E.W.; STARK, D.D.. A convenient method for the determination of water in petroleum and other organic emulsions. **The Journal of Industrial and Engineering Chemistry**. V. 12, n. 5., p. 486-490. 1920.

DOMENICO, Patrick A.; SCHWARTZ, Franklin W.. **Physical and Chemical Hydrogeology**. 2. ed. New York: John Wiley & Sons, Inc, 1998. 506 p.

DURNER, W. Hydraulic conductivity estimation for soils with heterogeneous pore structure, **Water Resour. Res.**, 30, 211–223, 1994.

DURNER, Wolfgang. Predicting the unsaturated hydraulic conductivity using multiporosity water retention curves. In M.Th. van Genuchten; F. J. Leiji; L. J. Lund. (ed.). **Proceedings of The International Workshop, Indirect Methods for Estimating the Hydraulic Properties of Unsaturated Soils**. University Of California, Riverside, Ca, p. 185-201, 1992.

DURNER, Wolfgang *et al.* Determination of Parameters for Flexible Hydraulic Functions by Inverse Modeling. In M.Th. van Genuchten; F. J. Leiji; L. Wu. (ed.), 1997. **Proceedings Of The International Workshop On Characterization And Measurement Of The Hydraulic Properties Of Unsaturated Porous Media**. University Of California, Riverside, Ca, p. 817-829, 1999.

FERREIRA, S.M. (2003) **Relação entre a espessura real e aparente da gasolina com etanol e da gasolina pura em colunas de laboratório**. São Paulo, 119p. Tese (Doutorado) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.

FETTER, Charles Willard. **Applied Hydrogeology**. 4.ed. New York, Prentice Hall, 1999. 615 p.

FETTER, Charles Willard. **Contaminant Hydrogeology**. New York: Macmillan Publishing Company, 1993. 515 p.

FREDLUND, D.G., XING, A.: Equations for the soil-water characteristic curve. **Canadian Geotechnical Journal**, nº 31, p. 521–532, 1994.

FREDLUND, D.G., XING, A., HUANG, S.: Predicting the permeability function for unsaturated soils using the soil-water characteristic curve. **Canadian Geotechnical Journal**, nº 31, p. 533–546, 1994.

FREEZE, R.; CHERRY, J. **Groundwater**. New Jersey: Prentice-Hall Inc, 1979. 604 p.

GERKE, H. H.; Van GENUCHTEN, M. Th. A dual-porosity model for simulating the preferential movement of water and solutes in structured porous media. **Water Resour. Res.** nº29, p. 305-319, 1993.

HILLEL, D. **Introduction to Environmental Soil Physics**. New York: Elsevier Academic Press, 2004. 494p.

IBGE, 2002. Mapa de clima do Brasil. 1:5.000.000.

IBGE, 2004. Mapa de vegetação do Brasil. 1:5.000.000. 3ª edição.

IBGE, 2006. Mapa de unidades de relevo do Brasil. 1:5.000.000. 2ª edição.

IBGE, 2001. Mapa de solos do Brasil. 1:5.000.000.

KOOREVAAR, P.; MENELIK, G.; DIRKSEN, C.. **Developments in Soil Science: Elements of Soil Science**. Amsterdam: Elsevier Science, 1983. 228 p. (13).

LENHARD, R. J.; PARKER, J. C.. Measurement and Prediction of Saturation-Pressure Relationships in Three-Phase Porous Media Systems. **Journal Of Contaminant Hydrology**. Amsterdam, p. 407-424. jan. 1987.

LENHARD, R. J.; PARKER, J. C.. A Model for Hysteretic Constitutive Relations Governing Multiphase Flow: 2. Permeability-Saturation Relations. **Water Resources Research**, Blacksburg, v. 23, n. 12, p.2197-2206, dez. 1987.

LENHARD, R. J. et al. Measurement and Simulation of One-Dimensional Transient Three-Phase Flow for Monotonic Liquid Drainage. **Water Resources Research**, v. 24, n. 6, p.853-863, jun. 1988.

LENHARD, R. J.; PARKER, J.C. (1990). Estimation of free hydrocarbon volume from fluid levels in monitoring wells. **Ground Water**. v.28, n.1,p. 57-67.

LEVERETT, M. C.. Capillary Behavior in Porous Media. **Transactions Of Society Of Petroleum Engineering: AIME**. Tulsa, p. 152-169. 1941.

LIBARDI, Paulo Leonel. **Água no Solo**. Disponível em: <http://pointer.esalq.usp.br/departamentos/leb/aulas/lce200/Agua_no_Solo.pdf>. Acesso em: 29 dez. 2013.

LIDE, D. R. **CRC Handbook of Chemistry and Physics**. 90th ed. Boca Raton: CRC Press, 2009. 2760 p.

MERCER, J.W.; COHEN, R.M. (1990). A review of immiscible fluids in the subsurface: properties, models, characterization and remediation. **J. Contaminant Hydrology**. v.6, p. 107-163.

MALLANTS, Dirk *et al.* Evaluation of multimodal hydraulic functions in characterizing a heterogeneous field soil. **Journal of Hydrology**. Amsterdam, nº195, p. 172-199. 1997.

MUALEM, Y. Hysteretical models for prediction of the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. **Water Resources Research**., 12, 1248-1254, 1976.

NITAO, J. J.; BEAR, J. Potentials and their role in transport in porous

media. **Water Resources Reseach**, v. 32, n. 2, p.225-250, fev. 1996

NOGAMI, J.S.; VILLIBOR, D.F. Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos. São Paulo: Vilibor, 1995. 240p.

NOGUEIRA, J. B. **Mecânica dos solos**: Ensaios de Laboratório. São Carlos: EESC-USP, 1998. 248 p.

OLIVA, Andresa; KIANG, Chang Hung; CAETANO-CHANG, Maria Rita. Determinação da condutividade hidráulica da Formação Rio Claro: análise comparativa através de análise granulométrica e ensaios com permeâmetro Ghuelph e testes de Slug. **Águas Subterrâneas**, São Paulo, v. 19, n. 2, p.1-17, jan. 2005.

OLIVA, Andresa. **Estudo Hidrofaciológico do Aquífero Rio Claro no Município de Rio Claro - SP**. 2006. 244 f. Tese (Doutorado) - Curso de Geociências e Meio Ambiente, IGCE, Univ Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Rio Claro, 2006.

OLIVEIRA, Everton de. **Ethanol flushing of gasoline residuals**: microscale and field scale experiments. 1997. 291 f. Doctor of Philosophy. Earth Science, University Of Waterloo, Waterloo, 1997.

PARKER, J.C.; LENHARD, R.J.; KUPPUSAMY, T.. A Parametric Model for Constitutive Properties Governing Multiphase Flow in Porous Media. **Water Resources Research**, v. 23, n. 4, p.618-624, abr. 1987.

PARKER, J.C.; LENHARD, R.J.. A Model for Hysteretic Constitutive Relations Governing Multiphase Flow: 1. Saturation-Pressure Relations. **Water Resources Research**, v. 23, n. 12, p.2187-2196, dez. 1987.

PEDE, M. A. Z. **Flutuação do lençol freático e sua implicação na recuperação de hidrocarbonetos: um estudo de caso**. 2009. f. 141. Tese (Doutorado) – Geociências e Meio Ambiente. Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Univ Estadual Paulista, Rio Claro, 2009.

PRIESACK, E.; DURNER, W.. Closed-Form Expression for the Multi-Modal Unsaturated Conductivity Function. **Vadose Zone Journal**. Madison, p. 121-124. 26 jan. 2006.

REYNOLDS, W.D.; ELRICK, D.E. In situ measurement of field saturated hydraulic conductivity, sorptivity, and the alpha-parameter using the Guelph permeameter. **Soil Science**, v.140, p.292-302,1985.

RICHARDS, L.A. (1931). Capillary conduction of liquids through porous mediums. **Physics**. v.1, p. 318-333.

ROY, Su-kim Delores. **Development and Incorporation of a NAPL Residual into the Lenhard-Parker Pressure-Saturation Hysteretic Model**. 1999. 133 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engineering, Ottawa-Carleton Institute For Civil Engineering, University Of Ottawa, Ottawa, 1999.

SELLEY, R. C.. **Applied Sedimentology**. 2 ed. London: Elsevier Academic Press, 2000. 523 p.

SILVA, A. M. **Banco de Dados de Curvas de Retenção de Água de Solos Brasileiros**. 2005. 141 f. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

SOTO, M. A. A. **Comparação entre métodos de imposição e de controle de sucção em ensaios com solos não saturados**. 2004. 233 f. Tese (Doutorado) - Curso de Geotecnia, Departamento de Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

SOTO, M. A. A. **Estudo da Condutividade Hidráulica em Solos Não Saturados**. 1999. 136 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Geotecnia, Departamento de Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999.

SOTO, M. A. A; CHANG, H. K. Permeabilidade relativa em zona vadosa com porosidade bimodal: um estudo em solos brasileiros. **Águas Subterrâneas**. 27 (2), 93-103, 2013.

SOTO, M. A. A.; CHANG, H. K.; VILAR, O. M.. Avaliação do escalonamento fractal de alguns solos brasileiros. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 2, n. 38, p.253-262, jun. 2008.

TESTA, Stephan M.; WINEGARDNER, Duane L.. **Restoration of Contaminated Aquifers: Petroleum Hydrocarbons and Organic Compounds**. 2. ed. Boca Raton: CRC Press LLC, 2000. 446 p

TULLER, M; OR, D. **Water Retention and Characteristic Curve**. 2005. Disponível em: <[http://www.webpages.uidaho.edu/hm/references/Soil properties/swc_2004.pdf](http://www.webpages.uidaho.edu/hm/references/Soil%20properties/swc_2004.pdf)>. Acesso em: 25 jan. 2014.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – USEPA. *Laboratory Investigation of Residual Liquid Organics from Spills, Leaks, and the Disposal of Hazardous Wastes in Groundwater*. Publ. EPA/600/6-90/004, April/1990.

VALLERO, D.A. (2004). **Environmental Contaminants – Assessment and Control**. Elsevier Academic Press. 801p.

VAN GENUCHTEN, M. Th. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, vol. 44, n5, pp. 892 -898, 1980.

VAN GENUCHTEN, M. Th.; LEIJI, F. J.; YATES, S. R.. **The RETC Code for Quantifying the Hydraulic Functions of Unsaturated Soils**. Ada: Robert S. Kerr Environmental Research Laboratory, 1991. 54 p. (EPA/600/2-91/065).

VAN LIER, Quirijn de Jong. **Cálculo de alguns parâmetros físicos do solo**. Disponível em:

<http://www.leb.esalq.usp.br/aulas/lce200/Calculo_de_alguns_parametros_fisicos_do_solo.pdf>. Acesso em: 29 dez. 2013.

VAFAL, K. **Handbook of Porous Media**. 2 ed. Boca Raton: Taylor & Francis, 2005. 747 p.

WILSON, J.L.; PETERSON, D.M. (1988). Variably saturated flow between streams and aquifers. **Technical completion report: Project No. 1345628**. Department of Geoscience and Geophysical Research Center New Mexico Institute of Mining and Technology.

WILSON, J.L.; CONRAD, S.H.; MASON, W.R.; PEPLINSKI, W.; HAGAN, E. (1990) Laboratory Investigation of Residual Liquid Organics from Spills, Leaks, and the Disposal of Hazardous Wastes in Groundwater. . **EPA/600/6-90/004**. , Robert S. Kerr Environmental Research Laboratory, U.S. Environmental Protection.

ZAINE, José Eduardo. **GEOLOGIA DA FORMAÇÃO RIO CLARO NA FOLHA RIO CLARO (SP)**. 1994. 98 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Geociências, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Univ Estadual Paulista, Rio Claro, 1994.

ZURMÜHL, Torsten; DURNER, Wolfgang. Determination of Parameters for Bimodal Hydraulic Functions by Inverse Modeling. **American Soil Science Society**. p. 874-880. jul. 1998.

Sites visitados

<http://www.etc-cte.ec.gc.ca/databases/Oilproperties/Default.aspx>

(21/01/2014)

8. ANEXOS

8.1. Medidas realizadas durante os ensaios – Sistema Água-Ar – Método do Funil de Placa Porosa

Tabela 8.1.1 – Sistema Água-Ar - Deslocamento e Medidas – Amostra #II			
Primeiro Deslocamento (0,5 kPa)			
Tempo (min.)	Hora	Leitura Bureta	T°C-W
0	14:00	25,00	22,10
1	14:01	24,30	22,10
3	14:03	23,80	22,10
5	14:05	23,40	22,05
10	14:10	23,30	22,00
20	14:20	23,30	22,00
30	14:30	23,38	22,00
45	14:45	23,42	21,90
60	15:00	23,50	22,00
Segundo Deslocamento (1,0 kPa)			
Tempo (min.)	Hora	Leitura Bureta	T°C-W
0	15:02	23,50	22,00
1	15:03	23,30	22,00
3	15:05	23,28	22,00
5	15:07	23,28	22,00
10	15:12	23,30	22,00
20	15:22	23,30	22,00
30	15:32	22,80	22,00
45	15:47	22,50	22,00
60	16:02	22,50	22,00
Terceiro Deslocamento (1,5 kPa)			
Tempo (min.)	Hora	Leitura Bureta	T°C-W
0	16:02	22,50	22,10
1	16:03	21,90	22,10
3	16:05	21,88	22,10
5	16:07	21,87	22,10
10	16:12	21,84	22,10
20	16:22	21,80	22,10
30	16:32	21,80	22,10
45	16:47	21,80	22,20
60	17:02	21,80	22,20

Tabela 8.1.1 - Continuação			
Quarto Deslocamento (2,0 kPa)			
Tempo (min.)	Hora	Leitura Bureta	T°C-W
0	17:02	21,80	22,20
1	17:03	19,80	22,20
3	17:05	19,40	22,20
5	17:07	19,20	22,20
10	17:12	19,10	22,20
20	17:22	19,00	22,20
30	17:32	19,00	22,20
45	17:47	18,98	22,30
60	18:02	18,91	22,30
240	21:02	18,91	22,10
Quinto Deslocamento (2,5 kPa)			
Tempo (min.)	Hora	Leitura Bureta	T°C-W
0	21:19	21,80	22,20
1	21:20	19,80	22,20
3	21:22	19,40	22,20
5	21:24	19,20	22,20
10	21:29	19,10	22,20
20	21:39	19,00	22,20
30	21:49	19,00	22,20
45	22:04	18,98	22,30
60	22:19	18,91	22,30
1020	14:19	18,91	22,10

Tabela 8.1.2 - Sistema Água-Ar - Deslocamento e Medidas – Amostra #III			
Primeiro Deslocamento (0,5 kPa)			
Tempo (min.)	Hora	Leitura Bureta	T°C-W
0	12:45	25,00	21,90
1	12:46	24,95	21,90
3	12:48	24,93	21,90
5	12:50	24,91	21,90
10	12:55	24,90	21,90
20	13:05	24,80	21,95
30	13:15	24,75	22,00
60	13:45	24,60	22,05
120	14:45	24,30	22,10
Segundo Deslocamento (1,0 kPa)			
Tempo (min.)	Hora	Leitura Bureta	T°C-W
0	15:06	24,30	22,10
1	15:07	24,25	22,10
3	15:09	24,22	22,10
5	15:11	24,20	22,10
10	15:16	24,19	22,20
20	15:26	24,15	22,40
30	15:36	24,12	22,40
60	16:06	24,11	22,60
120	17:06	24,11	22,80
Terceiro Deslocamento (1,5 kPa)			
Tempo (min.)	Hora	Leitura Bureta	T°C-W
0	17:14	24,11	22,80
1	17:15	24,11	22,80
3	17:17	24,11	22,80
5	17:19	24,10	22,80
10	17:24	24,10	22,80
20	17:34	24,08	22,80
30	17:44	24,06	22,80
60	18:14	24,05	22,90
1020	10:14	24,10	21,20
Quarto Deslocamento (2,0 kPa)			
Tempo (min.)	Hora	Leitura Bureta	T°C-W
0	10:27	24,10	21,40
1	10:28	24,09	21,40
3	10:30	24,09	21,40

Tabela 8.1.2 - Continuação			
5	10:32	24,04	21,40
10	10:37	24,00	21,40
20	10:47	23,91	21,40
30	10:57	23,84	21,50
60	10:27	23,70	21,60
120	12:27	23,45	22,00
210	13:57	22,72	22,20
300	15:27	21,75	22,90
390	16:57	21,32	22,40
1260	07:27	21,41	19,90
Quinto Deslocamento (2,5 kPa)			
Tempo (min.)	Hora	Leitura Bureta	T°C-W
0	09:55	21,50	21,00
1	09:56	21,50	21,00
3	09:58	21,46	21,00
5	10:00	21,46	21,00
10	10:05	21,42	21,00
20	10:15	21,42	21,00
30	10:25	21,40	21,00
60	10:55	21,31	21,05
120	11:55	21,24	21,10
210	13:25	21,20	21,20
300	14:55	21,20	21,50
Sexto Deslocamento (3,0 kPa)			
Tempo (min.)	Hora	Leitura Bureta	T°C-W
0	15:10	21,20	21,50
1	15:11	21,20	21,50
3	15:13	21,20	21,50
5	15:15	21,19	21,50
10	15:20	21,18	21,50
20	15:30	21,10	21,40
30	15:40	21,10	21,40
60	16:10	21,01	21,60
120	17:10	20,94	21,80
210	18:40	20,89	21,90
1140	10:10	21,00	20,90
Sétimo Deslocamento (3,5 kPa)			
Tempo (min.)	Hora	Leitura Bureta	T°C-W
0	11:12	21,00	20,90
1	11:13	20,99	20,90
3	11:15	20,96	20,90

Tabela 8.1.2 - Continuação			
5	11:17	20,95	21,00
10	11:22	20,92	21,00
20	11:32	20,90	21,00
30	11:42	20,82	21,00
60	12:12	20,72	21,00
120	13:12	20,61	21,80
210	14:42	20,51	21,90
300	16:12	20,50	21,90
390	17:42	20,46	22,00
1440	11:12	20,59	21,10
Oitavo Deslocamento (4,0 kPa)			
Tempo (min.)	Hora	Leitura Bureta	T°C-W
0	11:31	21,00	20,90
1	11:32	20,99	20,90
3	11:34	20,96	20,90
5	11:36	20,95	21,00
10	11:41	20,92	21,00
20	11:51	20,90	21,00
30	12:01	20,82	21,00
60	12:31	20,72	21,00
120	13:31	20,61	21,80
210	15:01	20,51	21,90
300	16:31	20,50	21,90
390	18:01	20,46	22,00
1410	11:01	20,59	21,10
1638	11:01	21,28	21,00

Tabela 8.1.3 - Sistema Água-Ar - Deslocamento e Medidas – Amostra #VII			
Primeiro Deslocamento (0,5 kPa)			
Tempo (min.)	Hora	Leitura Bureta	T°C-W
0	16:20	24,50	18,30
1	16:21	24,45	18,30
3	16:23	24,32	18,30
5	16:25	24,26	18,30
10	16:30	24,12	18,30
20	16:40	23,90	18,30
30	16:50	23,80	18,30
60	17:20	23,62	18,50
120	18:20	23,38	18,90
1080	10:20	24,10	18,40
Segundo Deslocamento (1,0 kPa)			
Tempo (min.)	Hora	Leitura Bureta	T°C-W
0	10:14	24,10	18,40
1	10:15	24,09	18,40
3	10:17	24,06	18,40
5	10:19	24,05	18,40
10	10:24	24,04	18,40
20	10:34	24,02	18,40
30	10:44	24,01	18,60
60	11:14	24,03	18,80
Terceiro Deslocamento (1,5 kPa)			
Tempo (min.)	Hora	Leitura Bureta	T°C-W
0	11:21	24,04	18,60
1	11:22	24,02	18,90
3	11:24	24,00	18,90
5	11:26	23,99	18,90
10	11:31	23,98	19,00
20	11:41	23,90	19,00
30	11:51	23,89	19,00
60	12:21	23,80	19,00
120	13:21	23,86	19,00
235	15:16	23,92	19,00
Quarto Deslocamento (2,0 kPa)			
Tempo (min.)	Hora	Leitura Bureta	T°C-W
0	15:16	23,92	19,00
1	15:17	23,90	19,00

Tabela 8.1.3 - Continuação			
3	15:19	23,90	19,00
5	15:21	23,89	19,00
10	15:26	23,84	19,00
20	15:36	23,78	19,00
30	15:46	23,70	19,00
60	16:16	23,58	19,00
120	17:16	23,28	18,95
210	18:16	23,10	19,00
1020	08:16	21,60	19,20
1110	09:46	21,30	19,40
1170	10:46	20,80	19,80
1230	11:46	20,60	19,95
1290	12:46	20,48	19,95
1410	14:46	20,40	20,00
1530	16:46	20,40	20,00
2430	07:46	20,70	19,20
Quinto Deslocamento (2,5 kPa)			
Tempo (min.)	Hora	Leitura Bureta	T°C-W
0	08:07	20,70	19,20
1	08:08	20,69	19,20
3	08:10	20,68	19,20
5	08:12	20,65	19,20
10	08:17	20,63	19,20
20	08:27	20,60	19,20
30	08:37	20,59	19,20
60	09:07	20,50	19,40
120	10:07	20,49	19,50
180	11:07	20,45	19,80
240	12:07	20,41	19,95
300	13:07	20,40	20,00
420	15:07	20,50	20,00
Sexto Deslocamento (3,0 kPa)			
Tempo (min.)	Hora	Leitura Bureta	T°C-W
0	15:27	20,50	20,00
1	15:28	20,50	20,00
3	15:30	20,49	20,00
5	15:32	20,48	20,00
10	15:37	20,40	20,00
20	15:47	20,39	20,00
30	15:57	20,38	20,00
60	16:27	20,30	20,00
120	17:27	20,25	20,00

Tabela 8.1.3 - Continuação			
420	22:27	20,16	20,50
1140	10:27	20,30	19,90
Sétimo Deslocamento (3,5 kPa)			
Tempo (min.)	Hora	Leitura Bureta	T°C-W
0	10:31	20,30	19,90
1	10:32	20,30	19,90
3	10:34	20,29	19,90
5	10:36	20,28	19,95
10	10:41	20,20	19,95
20	10:51	20,19	19,98
30	11:01	20,11	20,00
60	11:31	20,10	20,00
120	12:31	20,01	20,05
240	14:31	19,96	19,50
300	15:31	19,96	19,50
360	16:31	19,95	19,90
420	17:31	19,91	20,20
480	18:31	19,90	20,60
1800	16:31	20,02	20,20
Oitavo Deslocamento (4,0 kPa)			
Tempo (min.)	Hora	Leitura Bureta	T°C-W
0	16:36	20,02	20,20
1	16:37	20,00	20,20
3	16:39	20,00	20,20
5	16:41	20,00	20,20
10	16:46	19,99	20,20
20	16:56	19,90	20,20
30	17:06	19,90	20,20
60	17:36	19,89	20,30
120	18:36	19,79	20,60
180	19:36	19,70	21,00
900	07:36	19,64	20,20
1020	09:36	19,69	20,20

Tabela 8.1.4 - Sistema Água-Ar - Deslocamento e Medidas – Amostra #X			
Primeiro Deslocamento (0,5 kPa)			
Tempo (min.)	Hora	Leitura Bureta	T°C-W
0	11:00	24,70	22,00
1	11:01	24,62	22,00
3	11:03	24,48	22,10
5	11:05	24,40	22,10
10	11:10	24,28	22,10
20	11:20	24,10	22,10
30	11:30	23,97	22,10
60	12:00	23,77	22,30
150	13:30	23,55	22,90
240	15:00	23,43	23,00
330	16:30	23,40	23,15
630	21:30	23,41	23,00
1380	10:00	23,90	22,95
Segundo Deslocamento (1,0 kPa)			
Tempo (min.)	Hora	Leitura Bureta	T°C-W
0	10:14	23,91	22,95
1	10:15	23,80	22,95
3	10:17	23,72	22,95
5	10:19	23,70	22,95
10	10:24	23,70	23,00
20	10:34	23,70	23,00
30	10:44	23,69	23,00
60	11:14	23,69	23,00
120	12:14	23,69	23,00
296	15:10	23,90	22,95
Terceiro Deslocamento (1,5 kPa)			
Tempo (min.)	Hora	Leitura Bureta	T°C-W
0	15:10	23,90	22,95
1	15:11	23,80	22,95
3	15:13	23,65	22,95
5	15:15	23,58	22,95
10	15:20	23,25	22,95
20	15:30	22,20	22,95
30	15:40	21,80	22,95
60	16:10	20,95	22,95
90	16:40	19,60	22,95
120	17:10	19,20	22,90
150	17:40	19,15	22,90

Tabela 8.1.4 - Continuação			
180	18:10	19,13	22,90
300	20:10	19,13	23,00
420	22:10	19,20	23,05
1020	08:10	19,50	22,80
Quarto Deslocamento (2,0 kPa)			
Tempo (min.)	Hora	Leitura Bureta	T°C-W
0	08:23	19,50	22,80
1	08:24	19,41	22,80
3	08:26	19,38	22,80
5	08:28	19,30	22,80
10	08:33	19,21	22,80
20	08:43	19,14	22,80
30	08:53	19,11	22,90
60	09:23	19,10	22,95
90	09:53	19,10	23,00
120	10:23	19,10	23,00
150	10:53	19,11	23,00
Quinto Deslocamento (2,5 kPa)			
Tempo (min.)	Hora	Leitura Bureta	T°C-W
0	10:59	19,11	23,00
1	11:00	19,10	23,00
3	11:02	19,05	23,05
5	11:04	19,01	23,05
10	11:09	18,99	23,05
20	11:19	18,90	23,05
30	11:29	18,90	23,05
60	11:59	18,89	23,10
120	12:59	18,89	23,10
270	15:29	18,91	23,50
Sexto Deslocamento (3,0 kPa)			
Tempo (min.)	Hora	Leitura Bureta	T°C-W
0	15:32	18,91	20,00
1	15:33	18,89	20,00
3	15:35	18,85	20,00
5	15:37	18,80	20,00
10	15:42	18,71	20,00
20	15:52	18,69	20,00
30	16:02	18,67	20,00
60	16:32	18,67	20,00
90	17:02	18,67	20,00
120	17:32	18,69	20,50

Tabela 8.1.4 - Continuação			
Sétimo Deslocamento (3,5 kPa)			
Tempo (min.)	Hora	Leitura Bureta	T°C-W
0	17:37	18,69	23,20
1	17:38	18,66	23,20
3	17:40	18,60	23,20
5	17:42	18,54	23,20
10	17:47	18,50	23,20
20	17:57	18,40	23,20
30	18:07	18,39	23,20
60	18:37	18,36	23,10
90	19:07	18,35	23,10
120	19:37	18,35	23,10
150	20:07	18,32	23,10
180	20:37	18,32	23,10
960	09:37	18,50	22,90
Oitavo Deslocamento (4,0 kPa)			
Tempo (min.)	Hora	Leitura Bureta	T°C-W
0	09:47	18,50	22,95
1	09:48	18,42	22,95
3	09:50	18,36	22,95
5	09:52	18,33	22,95
10	09:57	18,30	22,95
20	10:07	18,26	22,95
30	10:17	18,20	22,95
60	10:47	18,19	22,80
90	11:17	18,19	22,80
120	11:47	18,19	22,80
240	13:47	18,19	22,50
300	14:47	18,18	23,00
420	16:47	18,21	22,40

Tabela 8.1.5 – Sistema Água-Ar - Deslocamento e Medidas – Amostra #XI			
Primeiro Deslocamento (0,5 kPa)			
Tempo (min.)	Hora	Leitura Bureta	T°C-W
0	08:17	24,15	22,40
1	08:18	24,05	22,40
3	08:20	24,00	22,40
5	08:22	23,98	22,40
10	08:27	23,80	22,40
20	08:37	23,50	22,40
30	08:47	23,31	22,40
60	09:17	22,75	22,50
120	10:17	22,19	22,80
180	11:17	21,84	22,90
240	12:17	21,69	22,90
360	14:17	21,59	22,95
420	15:17	21,59	22,95
Segundo Deslocamento (1,0 kPa)			
Tempo (min.)	Hora	Leitura Bureta	T°C-W
0	15:24	21,59	22,95
1	15:25	21,54	22,95
3	15:27	21,49	22,95
5	15:29	21,40	22,95
10	15:34	21,25	22,95
20	15:44	21,02	23,00
30	15:54	20,85	23,00
60	16:24	20,79	23,00
120	17:24	20,89	23,00
Terceiro Deslocamento (1,5 kPa)			
Tempo (min.)	Hora	Leitura Bureta	T°C-W
0	11:55	22,21	22,20
1	11:56	22,14	22,20
3	11:58	22,02	22,20
5	12:00	21,99	22,20
10	12:05	21,85	22,20
20	12:15	21,59	22,20
30	12:25	21,36	22,10
60	12:55	21,00	22,00
120	13:55	20,59	21,90
270	16:25	20,10	22,00
300	16:55	20,08	22,00
360	17:55	19,78	22,20

Tabela 8.1.5 – Continuação			
600	21:55	18,71	22,50
630	22:25	18,78	22,40
Quarto Deslocamento (2,0 kPa)			
Tempo (min.)	Hora	Leitura Bureta	T°C-W
0	10:27	19,29	20,90
1	10:28	19,20	20,90
3	10:30	19,18	20,90
5	10:32	19,11	20,90
10	10:37	19,09	20,95
20	10:47	19,01	21,00
30	10:57	18,99	21,00
60	11:27	18,98	21,10
120	12:27	19,00	21,50
Quinto Deslocamento (2,5 kPa)			
Tempo (min.)	Hora	Leitura Bureta	T°C-W
0	14:10	19,09	21,80
1	14:11	19,05	21,80
3	14:13	19,01	21,80
5	14:15	18,98	21,80
10	14:20	18,90	21,80
20	14:30	18,82	21,70
30	14:40	18,80	21,80
60	15:10	18,82	21,60
Sexto Deslocamento (3,0 kPa)			
Tempo (min.)	Hora	Leitura Bureta	T°C-W
0	15:14	18,82	21,60
1	15:15	18,80	21,60
3	15:17	18,79	21,60
5	15:19	18,75	21,60
10	15:24	18,69	21,60
20	15:34	18,60	21,70
30	15:44	18,52	21,80
60	16:14	18,42	21,80
90	17:14	18,39	21,90
120	19:14	18,39	21,90
960	07:44	18,60	20,00
Sétimo Deslocamento (3,5 kPa)			
Tempo (min.)	Hora	Leitura Bureta	T°C-W
0	07:50	18,60	20,00
1	07:51	18,59	20,00
3	07:53	18,52	20,05
5	07:55	18,49	20,05
10	08:00	18,41	20,05

Tabela 8.1.5 – Continuação			
20	08:10	18,38	20,05
30	08:20	18,31	20,05
60	08:50	18,29	20,10
120	09:50	18,28	20,50
180	10:50	18,27	20,90
240	11:50	18,24	21,00
330	13:20	18,22	21,60
420	14:50	18,22	21,80
480	15:50	18,23	21,95
Oitavo Deslocamento (4,0 kPa)			
Tempo (min.)	Hora	Leitura Bureta	T°C-W
0	15:57	18,23	21,95
1	15:58	18,21	21,95
3	16:00	18,20	21,95
5	16:02	18,18	21,95
10	16:07	18,09	21,95
20	16:17	18,00	22,00
30	16:27	17,99	22,00
60	16:57	17,90	22,05
120	17:57	17,89	22,10
180	18:57	17,89	22,05
960	07:57	18,02	20,05

8.2. Medidas realizadas durante os ensaios – Sistema Água-Ar – Método da Câmara de Pressão – Câmara de Richards

Tabela 8.2.1 - Sistema Água-Ar - Pressão e Medidas – Amostra #V (Câmara A)			
Data	Hora	Massa (g)	Δ massa (g)
Primeira Pressão (5 kPa)			
07/09/2013	12:00	200,73	
08/09/2013	12:52	200,33	0,40
09/09/2013	12:10	197,80	2,53
10/09/2013	12:00	195,36	2,44
11/09/2013	12:07	193,42	1,94
12/09/2013	12:02	192,02	1,40
13/09/2013	11:57	191,47	0,55
14/09/2013	12:26	191,04	0,43
15/09/2013	12:21	190,76	0,28
16/09/2013	12:40	190,08	0,68
17/09/2013	13:00	189,48	0,60
18/09/2013	12:50	189,15	0,33
19/09/2013	12:40	188,84	0,31
20/09/2013	12:20	188,64	0,20
21/09/2013	12:15	188,41	0,23
Segunda Pressão (10 kPa)			
22/09/2013	11:50	187,61	0,80
23/09/2013	10:33	186,89	0,72
24/09/2013	11:06	186,55	0,34
25/09/2013	10:25	185,94	0,61
26/09/2013	09:40	185,75	0,19
27/09/2013	09:13	185,56	0,19
28/09/2013	09:25	185,59	-0,03
29/09/2013	09:40	185,32	0,27
30/09/2013	09:55	185,19	0,13
Terceira Pressão (20 kPa)			
01/10/2013	10:23	184,42	0,77
02/10/2013	11:04	183,93	0,49
03/10/2013	09:55	183,59	0,34
04/10/2013	09:24	183,33	0,26
05/10/2013	12:02	183,05	0,28
06/10/2013	10:55	182,74	0,31
07/10/2013	09:57	182,56	0,18

Tabela 8.2.1 - Continuação			
08/10/2013	10:43	182,40	0,16
09/10/2013	10:58	182,32	0,08
Quarta Pressão (50 kPa)			
10/10/2013	10:22	181,80	0,52
11/10/2013	17:03	181,22	0,58
12/10/2013	17:15	180,92	0,30
13/10/2013	11:45	180,53	0,39
14/10/2013	11:22	180,22	0,31
15/10/2013	10:30	179,76	0,46
16/10/2013	10:10	179,61	0,15
Quinta Pressão (100 kPa)			
17/10/2013	10:59	179,36	0,25
18/10/2013	10:49	179,03	0,33
19/10/2013	20:10	178,70	0,33
20/10/2013	17:44	178,51	0,19
21/10/2013	10:24	178,27	0,24
22/10/2013	10:40	178,11	0,16
23/10/2013	10:25	177,96	0,15
24/10/2013	13:50	177,73	0,23
25/10/2013	10:05	177,65	0,08
Sexta Pressão (200 kPa)			
26/10/2013	12:36	177,45	0,20
27/10/2013	12:30	177,28	0,17
28/10/2013	14:06	177,06	0,22
29/10/2013	11:11	176,86	0,20
30/10/2013	11:35	176,80	0,06
Sétima Pressão (400 kPa)			
31/10/2013	12:15	176,61	0,19
01/11/2013	11:29	176,44	0,17
02/11/2013	16:16	176,28	0,16
03/11/2013	11:22	176,19	0,09
04/11/2013	08:39	176,06	0,13
05/11/2013	12:01	175,99	0,07
06/11/2013	11:30	175,90	0,09

Tabela 8.2.2 - Sistema Água-Ar - Pressão e Medidas – Amostra #IV (Câmara B)			
Data	Hora	Massa (g)	Δ massa (g)
Primeira Pressão (5 kPa)			
07/09/2013	12:01	199,97	
08/09/2013	12:54	193,78	6,19
09/09/2013	12:12	191,04	2,74
10/09/2013	12:03	189,79	1,25
11/09/2013	12:10	189,08	0,71
12/09/2013	12:05	188,79	0,29
13/09/2013	12:00	188,56	0,23
14/09/2013	12:28	188,52	0,04
15/09/2013	12:25	188,63	-0,11
16/09/2013	12:43	188,41	0,22
17/09/2013	13:03	188,35	0,06
18/09/2013	12:52	188,30	0,05
19/09/2013	12:43	188,29	0,01
20/09/2013	12:24	188,32	-0,03
21/09/2013	12:18	188,34	-0,02
Segunda Pressão (10 kPa)			
22/09/2013	11:54	186,65	1,69
23/09/2013	10:35	185,93	0,72
24/09/2013	11:09	185,70	0,23
25/09/2013	10:29	185,40	0,30
26/09/2013	09:43	185,43	-0,03
27/09/2013	09:16	185,43	0,00
28/09/2013	09:29	185,56	-0,13
29/09/2013	09:45	185,36	0,20
30/09/2013	10:01	185,39	-0,03
Terceira Pressão (20 kPa)			
01/10/2013	10:25	184,09	1,30
02/10/2013	11:07	183,49	0,60
03/10/2013	09:58	183,10	0,39
04/10/2013	09:29	182,86	0,24
05/10/2013	12:06	182,68	0,18
06/10/2013	10:58	182,55	0,13
07/10/2013	10:00	182,49	0,06
08/10/2013	10:46	182,47	0,02
09/10/2013	11:00	182,37	0,10
Quarta Pressão (50 kPa)			
10/10/2013	10:25	181,30	1,07
11/10/2013	17:07	180,55	0,75

Tabela 8.2.2 - Continuação			
12/10/2013	17:20	180,43	0,12
13/10/2013	11:48	180,11	0,32
14/10/2013	11:25	179,85	0,26
15/10/2013	10:35	179,53	0,32
16/10/2013	10:15	179,45	0,08
Quinta Pressão (100 kPa)			
17/10/2013	11:03	179,22	0,23
18/10/2013	10:52	178,88	0,34
19/10/2013	20:12	178,59	0,29
20/10/2013	17:47	178,39	0,20
21/10/2013	10:27	178,15	0,24
22/10/2013	10:44	178,02	0,13
23/10/2013	10:28	177,91	0,11
24/10/2013	13:52	177,71	0,20
25/10/2013	10:09	177,62	0,09
Sexta Pressão (200 kPa)			
26/10/2013	12:40	177,43	0,19
27/10/2013	12:33	177,24	0,19
28/10/2013	14:10	177,04	0,20
29/10/2013	11:15	176,83	0,21
30/10/2013	11:38	176,73	0,10
Sétima Pressão (400 kPa)			
31/10/2013	12:18	176,43	0,30
01/11/2013	12:32	176,28	0,15
02/11/2013	16:18	176,19	0,09
03/11/2013	11:25	176,03	0,16
04/11/2013	08:43	175,92	0,11
05/11/2013	12:05	175,83	0,09
06/11/2013	11:34	175,74	0,09

Tabela 8.2.3 - Sistema Água-Ar - Pressão e Medidas – Amostra #VIII (Câmara C)			
Data	Hora	Massa (g)	Δ massa (g)
Primeira Pressão (5 kPa)			
07/09/2013	12:06	196,70	
08/09/2013	12:56	196,93	-0,23
09/09/2013	12:15	197,06	-0,13
10/09/2013	12:06	195,28	1,78
11/09/2013	12:12	193,35	1,93
12/09/2013	12:07	191,98	1,37
13/09/2013	12:03	191,04	0,94
14/09/2013	12:31	190,54	0,50
15/09/2013	12:28	190,27	0,27
16/09/2013	12:45	189,80	0,47
17/09/2013	13:06	189,50	0,30
18/09/2013	12:56	189,30	0,20
19/09/2013	12:45	189,13	0,17
20/09/2013	12:26	188,98	0,15
21/09/2013	12:24	188,90	0,08
Segunda Pressão (10 kPa)			
22/09/2013	11:58	188,04	0,86
23/09/2013	10:37	187,39	0,65
24/09/2013	11:12	187,00	0,39
25/09/2013	10:32	186,48	0,52
26/09/2013	09:47	186,32	0,16
27/09/2013	09:19	186,18	0,14
28/09/2013	09:33	186,26	-0,08
29/09/2013	09:49	185,90	0,36
30/09/2013	10:07	185,88	0,02
Terceira Pressão (20 kPa)			
01/10/2013	10:27	185,18	0,70
02/10/2013	11:10	184,69	0,49
03/10/2013	10:01	184,28	0,41
04/10/2013	09:32	184,00	0,28
05/10/2013	12:09	183,73	0,27
06/10/2013	11:01	183,49	0,24
07/10/2013	10:03	183,36	0,13
08/10/2013	10:50	183,28	0,08
09/10/2013	11:02	183,21	0,07
Quarta Pressão (50 kPa)			
10/10/2013	10:31	182,54	0,67
11/10/2013	17:12	182,00	0,54

Tabela 8.2.3 - Continuação			
12/10/2013	17:25	181,98	0,02
13/10/2013	11:53	181,50	0,48
14/10/2013	11:30	181,09	0,41
15/10/2013	10:38	180,68	0,41
16/10/2013	10:19	180,60	0,08
Quinta Pressão (100 kPa)			
17/10/2013	11:05	180,23	0,37
18/10/2013	10:55	179,94	0,29
19/10/2013	20:15	179,61	0,33
20/10/2013	17:52	179,52	0,09
21/10/2013	10:30	179,19	0,33
22/10/2013	10:46	179,03	0,16
23/10/2013	10:32	178,92	0,11
24/10/2013	13:56	178,72	0,20
25/10/2013	10:12	178,66	0,06
Sexta Pressão (200 kPa)			
26/10/2013	12:44	178,46	0,20
27/10/2013	12:35	178,30	0,16
28/10/2013	14:12	178,08	0,22
29/10/2013	11:18	177,86	0,22
30/10/2013	11:42	177,80	0,06
Sétima Pressão (400 kPa)			
31/10/2013	12:20	177,63	0,17
01/11/2013	11:34	177,47	0,16
02/11/2013	16:20	177,34	0,13
03/11/2013	11:28	177,28	0,06
04/11/2013	08:45	177,16	0,12
05/11/2013	12:10	177,14	0,02
06/11/2013	11:38	177,09	0,05

**8.3. Medidas realizadas durante os ensaios – Sistema Querosene- Ar –
Método do Funil de Placa Porosa**

Tabela 8.3.1 - Sistema Querosene-Ar - Deslocamento e Medidas – Amostra #XIV				
Primeiro Deslocamento (0,5 kPa)				
Tempo (min)	Hora	Leitura Bureta	T°C-Q	T°C-A
0	11:51	24,85	24,30	24,00
1	11:52	24,85	24,30	23,80
3	11:54	24,83	24,30	23,80
5	11:56	24,80	24,20	24,00
10	12:01	24,79	24,20	24,00
20	12:11	24,73	24,20	23,80
30	12:21	24,70	24,15	23,30
60	12:51	24,62	24,00	23,00
180	14:51	24,44	23,40	23,00
240	15:51	24,34	23,40	22,50
300	16:51	24,30	23,60	23,60
1200	07:51	24,90	24,30	25,10
Segundo Deslocamento (1,0 kPa)				
Tempo (min)	Hora	Leitura Bureta	T°C-Q	T°C-A
0	08:27	24,90	24,30	25,10
1	08:28	24,85	24,30	25,30
3	08:30	24,73	24,30	25,30
5	08:32	24,68	24,30	25,30
10	08:37	24,50	24,40	24,50
20	08:47	24,28	24,40	25,10
30	08:57	24,14	24,50	25,20
60	09:27	23,98	24,30	24,40
300	13:27	23,40	23,00	22,30
360	14:27	23,39	23,00	22,50
660	19:27	23,89	22,95	23,30
Terceiro Deslocamento (1,5 kPa)				
Tempo (min)	Hora	Leitura Bureta	T°C-Q	T°C-A
0	19:27	23,39	22,95	23,30
1	19:28	23,30	22,95	23,30
3	19:30	23,23	22,95	23,30
5	19:32	23,12	22,95	23,30
10	19:37	22,90	22,95	23,20
20	19:47	22,44	22,95	23,20

Tabela 8.3.1 - Continuação				
30	19:57	21,92	22,95	24,20
60	20:27	21,35	23,10	24,70
120	21:27	21,00	23,80	25,00
900	10:27	21,30	23,95	24,00
Quarto Deslocamento (2,0 kPa)				
Tempo (min)	Hora	Leitura Bureta	T°C-Q	T°C-A
0	10:43	21,30	24,10	23,90
1	10:44	21,29	24,10	23,90
3	10:46	21,23	24,10	23,90
5	10:48	21,20	24,10	23,90
10	10:53	21,15	24,05	22,50
20	11:03	21,02	24,00	22,50
30	11:13	20,95	24,00	23,00
60	11:43	20,88	23,90	22,30
240	14:43	20,90	23,90	23,00
Quinto Deslocamento (2,5 kPa)				
Tempo (min)	Hora	Leitura Bureta	T°C-Q	T°C-A
0	15:21	20,90	23,00	22,50
1	15:22	20,85	23,00	22,50
3	15:24	20,83	23,00	22,50
5	15:26	20,79	23,00	22,50
10	15:31	20,70	23,00	21,10
20	15:41	20,58	22,95	20,90
30	15:51	20,47	22,95	22,20
60	16:21	20,30	23,00	22,50
120	17:21	20,20	23,00	22,50
180	18:21	20,17	22,95	21,90
240	19:21	20,16	22,95	22,00
300	20:21	20,16	22,80	21,60
480	23:21	20,12	23,00	23,40
1080	09:21	20,30	23,60	22,50
Sexto Deslocamento (3,0 kPa)				
Tempo (min)	Hora	Leitura Bureta	T°C-Q	T°C-A
0	09:58	20,30	23,80	22,50
1	09:59	20,28	23,90	23,00
3	10:01	20,21	23,90	23,00
5	10:03	20,15	23,90	23,20
10	10:08	20,10	23,90	23,20
20	10:18	19,92	23,80	23,00
30	10:28	19,86	23,80	22,50
60	10:58	19,70	23,70	22,30
120	11:58	19,60	23,30	22,50
300	14:58	19,56	23,30	23,20

Tabela 8.3.1 - Continuação				
360	15:58	19,55	23,40	23,30
420	16:58	19,55	23,40	23,00
480	17:58	19,57	23,10	22,50
Sétimo Deslocamento (3,50 kPa)				
Tempo (min)	Hora	Leitura Bureta	T°C-Q	T°C-A
0	18:04	19,57	23,10	22,50
1	18:05	19,52	23,10	22,50
3	18:07	19,48	23,10	22,50
5	18:09	19,41	23,10	22,50
10	18:14	19,32	23,20	24,10
20	18:24	19,22	23,20	22,90
30	18:34	19,11	23,10	23,00
60	19:04	18,92	23,05	22,50
120	20:04	18,78	23,20	24,30
180	21:04	18,73	23,40	23,70
960	10:04	18,88	23,20	23,00
Oitavo Deslocamento (4,0 kPa)				
Tempo (min)	Hora	Leitura Bureta	T°C-Q	T°C-A
0	10:38	18,89	23,20	23,30
1	10:39	18,84	23,20	23,00
3	10:41	18,80	23,20	23,00
5	10:43	18,74	23,20	22,30
10	10:48	18,64	23,20	23,20
20	10:58	18,53	23,20	22,40
30	11:08	18,44	23,10	22,60
60	11:38	18,23	23,05	22,20
240	14:38	18,11	22,70	22,10
300	15:38	18,11	22,50	22,30
360	16:38	18,11	22,60	22,50
420	17:38	18,10	22,90	23,40
480	18:38	18,10	22,90	23,00
540	19:38	18,11	22,90	23,30
Nono Deslocamento (4,5 kPa)				
Tempo (min)	Hora	Leitura Bureta	T°C-Q	T°C-A
0	19:55	18,11	22,90	23,10
1	19:56	18,09	22,90	23,10
3	19:58	18,05	22,90	23,10
5	20:00	18,00	23,00	23,40
10	20:05	17,90	23,00	23,40
20	20:15	17,72	23,00	23,60
30	20:25	17,63	23,00	23,20
60	20:55	17,41	23,00	23,40
120	21:55	17,27	23,05	23,80

Tabela 8.3.1 - Continuação				
180	22:55	17,21	23,20	23,80
900	10:55	17,41	23,40	23,80
Décimo Deslocamento (5,0 kPa)				
Tempo (min)	Hora	Leitura Bureta	T°C-Q	T°C-A
0	11:42	17,42	23,30	23,40
1	11:43	17,40	23,30	23,40
3	11:45	17,37	23,30	23,40
5	11:47	17,30	23,30	23,60
10	11:52	17,21	23,30	23,80
20	12:02	17,08	23,40	24,00
30	12:12	16,97	23,40	23,60
60	12:42	16,80	23,40	23,40
120	13:42	16,63	23,30	23,60
240	15:42	16,63	23,20	23,60
300	16:42	16,63	23,20	24,00
360	17:42	16,67	23,40	23,60

Tabela 8.3.2 - Sistema Querosene-Ar - Deslocamento e Medidas – Amostra #XXV				
Primeiro Deslocamento (0,5 kPa)				
Tempo (min)	Hora	Leitura Bureta	T°C-Q	T°C-A
0	12:20	24,20	23,10	23,00
1	12:21	24,17	23,10	23,00
3	12:23	24,11	23,10	23,00
5	12:25	24,01	23,10	23,20
10	12:30	23,85	23,10	23,00
20	12:40	23,71	23,10	23,00
30	12:50	23,68	23,10	22,60
60	13:20	23,54	23,05	22,60
180	15:20	23,50	22,95	22,60
240	16:20	23,52	22,95	22,20
Segundo Deslocamento (1,0 kPa)				
Tempo (min)	Hora	Leitura Bureta	T°C-Q	T°C-A
0	16:23	23,52	22,95	22,20
1	16:24	23,47	22,95	21,70
3	16:26	23,40	22,95	21,70
5	16:28	23,34	22,95	22,50
10	16:33	23,18	22,95	22,60
20	16:43	23,05	22,95	22,40
30	16:53	22,98	22,95	21,70
60	17:23	22,72	22,90	20,90
120	18:23	22,46	22,95	23,00
180	19:23	22,40	23,00	23,60
240	20:23	22,37	23,05	23,80
1020	09:23	22,21	23,90	23,90
1080	10:23	22,24	23,90	24,10
Terceiro Deslocamento (1,5 kPa)				
Tempo (min)	Hora	Leitura Bureta	T°C-Q	T°C-A
0	10:24	22,24	23,90	23,90
1	10:25	22,20	23,90	24,10
3	10:27	22,11	23,90	23,90
5	10:29	22,03	23,90	23,90
10	10:34	21,80	23,90	24,40
20	10:44	21,30	23,95	24,10
30	10:54	20,60	23,90	23,70
60	11:24	19,90	23,90	24,10
120	12:24	19,43	23,90	23,90
300	15:24	19,51	23,90	24,10

Tabela 8.3.2 - Continuação				
Quarto Deslocamento (2,0 kPa)				
Tempo (min)	Hora	Leitura Bureta	T°C-Q	T°C-A
0	15:25	19,51	23,90	24,10
1	15:26	19,48	23,90	24,10
3	15:28	19,41	23,90	24,10
5	15:30	19,39	23,90	23,90
10	15:35	19,30	23,90	23,90
20	15:45	19,20	23,90	23,90
30	15:55	19,11	23,90	24,10
60	16:25	19,01	23,90	23,90
120	17:25	19,00	23,95	23,70
180	18:25	19,00	23,95	24,10
240	19:25	19,02	23,95	24,10
Quinto Deslocamento (2,5 kPa)				
Tempo (min)	Hora	Leitura Bureta	T°C-Q	T°C-A
0	20:59	19,05	23,95	24,40
1	21:00	19,01	23,95	24,40
3	21:02	18,99	23,95	24,40
5	21:04	18,92	23,95	24,10
10	21:09	18,84	23,95	24,10
20	21:19	18,70	23,95	24,40
30	21:29	18,60	23,95	23,90
60	21:59	18,43	23,95	24,10
120	22:59	18,34	23,95	24,10
720	08:59	18,40	23,70	24,00
Sexto Deslocamento (3,0 kPa)				
Tempo (min)	Hora	Leitura Bureta	T°C-Q	T°C-A
0	09:07	18,40	23,70	24,00
1	09:08	18,36	23,70	24,20
3	09:10	18,31	23,70	24,20
5	09:12	18,28	23,70	23,90
10	09:17	18,15	23,60	24,10
20	09:27	17,97	23,70	24,10
30	09:37	17,85	23,70	23,90
60	10:07	17,63	23,80	24,10
120	11:07	17,49	23,80	24,00
180	12:07	17,42	23,90	24,10
360	15:07	17,40	23,70	24,30
420	16:07	17,41	23,90	23,70
Sétimo Deslocamento (3,5 kPa)				
Tempo (min)	Hora	Leitura Bureta	T°C-Q	T°C-A
0	16:10	17,41	23,90	23,70
1	16:11	17,39	23,90	23,70

Tabela 8.3.2 - Continuação				
3	16:13	17,36	23,90	23,70
5	16:15	17,33	23,90	24,10
10	16:20	17,25	23,90	24,10
20	16:30	17,15	23,90	23,70
30	16:40	17,06	23,90	24,40
60	17:10	16,90	23,90	23,90
240	20:10	16,80	23,90	24,40
300	21:10	16,80	23,95	24,10
360	22:10	16,81	23,30	23,90
Oitavo Deslocamento (4,0 kPa)				
Tempo (min)	Hora	Leitura Bureta	T°C-Q	T°C-A
0	10:30	17,00	23,30	24,00
1	10:31	16,95	23,30	23,90
3	10:33	16,91	23,30	23,90
5	10:35	16,85	23,30	23,80
10	10:40	16,80	23,30	24,00
20	10:50	16,67	23,30	23,80
30	11:00	16,54	23,30	23,70
60	11:30	16,39	23,40	23,70
120	12:30	16,30	23,40	23,70
240	14:30	16,29	23,50	23,70
300	15:30	16,29	23,60	23,70
360	16:30	16,29	23,70	23,50
420	17:30	16,31	23,70	23,30
Nono Deslocamento (4,5 kPa)				
Tempo (min)	Hora	Leitura Bureta	T°C-Q	T°C-A
0	17:35	16,31	23,70	23,30
1	17:36	16,28	23,70	23,70
3	17:38	16,23	23,70	23,70
5	17:40	16,19	23,70	23,70
10	17:45	16,11	23,80	23,90
20	17:55	15,97	23,80	23,90
30	18:05	15,86	23,80	23,90
60	18:35	15,70	23,90	24,10
120	19:35	15,60	23,90	23,90
180	20:35	15,59	23,90	23,90
240	21:35	15,59	23,90	23,70
300	22:35	15,60	23,90	23,70
Décimo Deslocamento (5,0 kPa)				
Tempo (min)	Hora	Leitura Bureta	T°C-Q	T°C-A
0	07:50	15,78	23,10	23,80
1	07:51	15,73	23,10	23,80
3	07:53	15,70	23,10	23,80

Tabela 8.3.2 - Continuação				
5	07:55	15,67	23,10	24,00
10	08:00	15,59	23,10	24,00
20	08:10	15,42	23,10	23,60
30	08:20	15,30	23,10	23,80
60	08:50	15,16	23,20	24,20
120	09:50	15,06	23,20	24,10
180	10:50	15,04	23,40	23,90
240	11:50	15,04	23,50	23,90
300	12:50	15,08	23,50	23,70

Tabela 8.3.3 - Sistema Querosene-Ar - Deslocamento e Medidas – Amostra #XXVI				
Primeiro Deslocamento (0,5 kPa)				
Tempo (min)	Hora	Leitura Bureta	T°C-Q	T°C-A
0	11:19	24,90	23,70	23,70
1	11:20	24,88	23,70	23,70
3	11:21	24,85	23,70	23,70
5	11:24	24,80	23,70	24,10
10	11:29	24,72	23,70	24,10
20	11:39	24,60	23,60	24,10
30	11:49	24,48	23,70	23,70
60	12:19	24,19	23,80	24,10
120	13:19	24,17	23,90	23,90
180	14:19	24,20	23,90	23,70
Segundo Deslocamento (1,0 kPa)				
Tempo (min)	Hora	Leitura Bureta	T°C-Q	T°C-A
0	14:20	24,20	23,90	23,70
1	14:21	24,19	23,90	23,70
3	14:23	24,18	23,90	23,70
5	14:25	24,16	23,90	23,70
10	14:30	24,14	23,90	24,10
20	14:40	24,13	23,90	24,30
30	14:50	24,12	23,95	24,30
60	15:20	24,12	23,90	23,90
120	16:20	24,18	24,00	23,90
Terceiro Deslocamento (1,5 kPa)				
Tempo (min)	Hora	Leitura Bureta	T°C-Q	T°C-A
0	16:35	24,18	23,95	24,00
1	16:36	24,15	23,95	24,00
3	16:38	24,13	23,95	23,80
5	16:40	24,11	23,95	23,80
10	16:45	24,11	23,95	23,80
20	16:55	24,10	23,95	23,80
30	17:05	24,10	23,95	23,60
60	17:35	24,11	23,95	23,80
Quarto Deslocamento (2,0 kPa)				
Tempo (min)	Hora	Leitura Bureta	T°C-Q	T°C-A
0	17:37	24,11	23,95	23,70
1	17:38	24,10	23,95	23,70
3	17:40	24,08	23,95	23,70
5	17:42	24,02	23,95	23,90
10	17:47	23,92	23,95	23,90

Tabela 8.3.3 - Continuação				
20	17:57	23,82	23,95	23,80
30	18:07	23,72	23,95	24,00
60	18:37	23,42	23,95	23,80
120	19:37	22,99	23,95	23,70
180	20:37	22,66	23,95	23,70
300	22:37	21,82	23,95	24,30
360	23:37	21,57	23,95	24,00
1020	10:37	21,92	23,90	24,40
Quinto Deslocamento (2,5 kPa)				
Tempo (min)	Hora	Leitura Bureta	T°C-Q	T°C-A
0	11:06	21,92	23,90	23,70
1	11:07	21,91	23,90	23,50
3	11:09	21,86	23,90	23,90
5	11:11	21,81	23,90	24,10
10	11:16	21,72	23,90	23,60
20	11:26	21,50	23,90	24,00
30	11:36	21,25	23,90	24,30
60	12:06	20,79	23,95	24,00
120	13:06	20,51	23,95	23,90
180	14:06	20,30	23,90	23,30
240	15:06	20,17	23,90	23,80
300	16:06	20,07	23,95	23,80
420	18:06	19,91	23,90	24,00
480	19:06	19,90	23,95	23,80
540	20:06	19,88	23,95	23,80
660	22:06	19,82	23,95	24,00
720	23:06	19,81	23,95	24,30
1260	08:06	19,87	23,95	24,40
Sexto Deslocamento (3,0 kPa)				
Tempo (min)	Hora	Leitura Bureta	T°C-Q	T°C-A
0	08:27	19,88	23,95	24,10
1	08:28	19,88	23,95	24,10
3	08:30	19,85	23,95	24,30
5	08:32	19,85	23,95	23,80
10	08:37	19,82	23,95	24,30
20	08:47	19,80	23,95	24,30
30	08:57	19,78	23,95	24,00
60	09:27	19,70	23,95	23,80
120	10:27	19,58	23,95	24,00
180	11:27	19,48	23,95	24,30
240	12:27	19,39	23,95	24,30
360	14:27	19,27	24,00	24,30
420	15:27	19,22	24,00	23,80

Tabela 8.3.3 - Continuação				
480	16:27	19,20	24,00	24,00
540	17:27	19,18	24,00	23,80
600	18:27	19,14	24,00	24,00
720	20:27	19,11	23,95	24,00
780	21:27	19,11	23,95	24,30
840	22:27	19,11	23,95	24,30
1490	09:17	19,19	23,40	24,40
Sétimo Deslocamento (3,50 kPa)				
Tempo (min)	Hora	Leitura Bureta	T°C-Q	T°C-A
0	09:25	19,19	23,40	23,80
1	09:26	19,19	23,40	23,80
3	09:28	19,18	23,40	24,10
5	09:30	19,18	23,40	24,40
10	09:35	19,17	23,40	23,90
20	09:45	19,11	23,40	24,10
30	09:55	19,10	23,40	23,70
60	10:25	19,02	23,50	24,40
120	11:25	18,91	23,60	24,10
180	12:25	18,82	23,80	23,70
240	14:25	18,70	23,80	23,70
300	15:25	18,64	23,80	24,00
360	16:25	18,60	23,80	23,60
420	17:25	18,59	23,90	24,30
480	18:25	18,56	23,90	23,70
540	19:25	18,54	23,90	23,70
1380	08:25	18,61	23,20	23,70
Oitavo Deslocamento (4,0 kPa)				
Tempo (min)	Hora	Leitura Bureta	T°C-Q	T°C-A
0	09:12	18,61	23,10	23,70
1	09:13	18,61	23,10	24,10
3	09:15	18,60	23,10	24,10
5	09:17	18,59	23,10	24,10
10	09:22	18,59	23,10	23,70
20	09:32	18,55	23,10	23,70
30	09:42	18,52	23,10	23,70
60	10:12	18,41	23,20	24,40
120	11:12	18,36	23,00	22,70
180	12:12	18,24	23,05	23,70
420	16:12	18,04	23,50	23,70
480	17:12	18,01	23,30	23,50
780	22:12	18,00	23,40	23,70
1450	09:22	18,11	23,30	23,50

Tabela 8.3.3 - Continuação				
Nono Deslocamento (4,5 kPa)				
Tempo (min)	Hora	Leitura Bureta	T°C-Q	T°C-A
0	09:41	18,11	23,30	24,10
1	09:42	18,10	23,30	24,10
3	09:44	18,10	23,30	24,10
5	09:46	18,10	23,30	23,90
10	09:51	18,09	23,30	23,90
20	10:01	18,03	23,30	23,90
30	10:11	18,00	23,30	24,10
60	10:41	17,91	23,40	23,70
120	11:41	17,79	23,40	23,50
180	12:41	17,68	23,40	23,90
300	14:41	17,52	23,40	23,70
360	15:41	17,50	23,50	23,70
420	16:41	17,46	23,60	23,70
720	21:41	17,41	23,80	23,90
780	22:41	17,41	23,90	24,10
1440	09:41	17,59	23,50	23,70
Décimo Deslocamento (5,0 kPa)				
Tempo (min)	Hora	Leitura Bureta	T°C-Q	T°C-A
0	10:12	17,59	23,50	23,70
1	10:13	17,59	23,60	23,70
3	10:15	17,59	23,60	23,90
5	10:17	17,58	23,60	23,90
10	10:22	17,54	23,60	23,70
20	10:32	17,51	23,60	23,70
30	10:42	17,49	23,60	23,90
60	11:12	17,49	23,70	24,10
120	12:12	17,31	23,80	23,70
300	15:12	17,11	23,80	23,70
360	16:12	17,09	23,80	23,90
420	17:12	17,09	23,90	23,70
480	18:12	17,05	23,90	24,10
1740	15:12	17,39	23,30	23,50

Tabela 8.3.4 - Sistema Querosene-Ar - Deslocamento e Medidas – Amostra #XXVII				
Primeiro Deslocamento (0,5 kPa)				
Tempo (min)	Hora	Leitura Bureta	T°C-Q	T°C-A
0	18:26	24,49	23,95	23,80
1	18:27	24,42	23,95	23,80
3	18:29	24,39	23,95	23,60
5	18:31	24,37	23,95	23,80
10	18:36	24,36	23,95	23,80
20	18:46	24,36	23,95	23,20
30	18:56	24,36	23,95	23,90
60	19:26	24,39	23,95	23,90
Segundo Deslocamento (1,0 kPa)				
Tempo (min)	Hora	Leitura Bureta	T°C-Q	T°C-A
0	19:29	24,39	23,95	23,90
1	19:30	24,36	23,95	24,10
3	19:32	24,34	23,95	23,50
5	19:34	24,34	23,95	23,70
10	19:39	24,33	23,95	23,90
20	19:49	24,32	23,95	23,90
30	19:59	24,31	23,95	24,00
60	20:29	24,31	23,95	23,70
180	22:29	24,31	23,95	24,10
240	23:29	24,32	23,95	24,00
780	10:29	24,40	23,90	24,40
Terceiro Deslocamento (1,5 kPa)				
Tempo (min)	Hora	Leitura Bureta	T°C-Q	T°C-A
0	11:04	24,40	23,90	24,10
1	11:05	24,34	23,90	23,70
3	11:07	24,23	23,90	23,50
5	11:09	24,12	23,90	23,90
10	11:14	23,91	23,90	24,00
20	11:24	23,53	23,90	23,90
30	11:34	23,09	23,90	23,80
60	12:04	21,70	23,95	24,00
120	13:04	20,78	23,95	23,90
180	14:04	20,32	23,90	23,30
240	15:04	20,33	23,90	23,80

Tabela 8.3.4 - Continuação				
Quarto Deslocamento (2,0 kPa)				
Tempo (min)	Hora	Leitura Bureta	T°C-Q	T°C-A
0	15:10	20,33	23,90	24,00
1	15:11	20,30	23,90	24,00
3	15:13	20,27	23,90	23,80
5	15:15	20,18	23,90	24,00
10	15:20	19,96	23,90	24,00
20	15:30	19,45	23,95	23,70
30	15:40	19,14	23,95	23,80
60	16:10	18,91	23,95	24,30
180	18:10	18,81	23,90	24,00
240	19:10	18,84	23,90	23,80
Quinto Deslocamento (2,5 kPa)				
Tempo (min)	Hora	Leitura Bureta	T°C-Q	T°C-A
0	19:14	18,84	23,95	23,80
1	19:15	18,80	23,95	23,80
3	19:17	18,75	23,95	23,80
5	19:19	18,70	23,95	24,00
10	19:24	18,60	23,95	24,00
20	19:34	18,47	23,95	23,80
30	19:44	18,34	23,95	24,00
60	20:14	18,20	23,95	24,00
180	22:14	18,01	23,95	24,30
240	23:14	18,00	23,95	24,30
780	08:14	18,21	23,95	24,40
Sexto Deslocamento (3,0 kPa)				
Tempo (min)	Hora	Leitura Bureta	T°C-Q	T°C-A
0	08:29	18,22	23,95	24,10
1	08:30	18,20	23,95	24,30
3	08:32	18,18	23,95	23,80
5	08:34	18,13	23,95	23,80
10	08:39	18,06	23,95	24,00
20	08:49	17,94	23,95	23,80
30	08:59	17,87	23,95	24,00
60	09:29	17,73	23,95	23,80
120	10:29	17,68	23,95	24,00
180	11:29	17,68	23,95	24,30
240	12:29	17,68	23,95	24,30
360	14:29	17,70	24,00	24,30

Tabela 8.3.4 - Continuação				
Sétimo Deslocamento(3,50 kPa)				
Tempo (min)	Hora	Leitura Bureta	T°C-Q	T°C-A
0	14:40	17,70	24,00	24,00
1	14:41	17,68	24,00	24,00
3	14:43	17,63	24,00	24,30
5	14:45	17,60	24,00	24,00
10	14:50	17,51	24,00	24,00
20	15:00	17,40	24,00	23,80
30	15:10	17,30	24,00	24,00
60	15:40	17,12	24,00	24,30
120	16:40	17,02	24,00	24,30
180	17:40	17,00	24,00	24,30
240	18:40	17,00	24,00	24,00
360	20:40	17,03	23,95	24,00
Oitavo Deslocamento (4,0 kPa)				
Tempo (min)	Hora	Leitura Bureta	T°C-Q	T°C-A
0	20:44	17,03	23,95	24,00
1	20:45	17,00	23,95	23,80
3	20:47	16,98	23,95	23,80
5	20:49	16,92	23,95	23,80
10	20:54	16,84	23,95	24,00
20	21:04	16,70	23,95	24,00
30	21:14	16,61	23,95	24,30
60	21:44	16,45	23,95	24,50
120	22:44	16,33	24,00	24,30
1475	09:19	16,52	23,40	24,40
Nono Deslocamento (4,5 kPa)				
Tempo (min)	Hora	Leitura Bureta	T°C-Q	T°C-A
0	09:21	16,52	23,40	24,40
1	09:22	16,50	23,40	24,40
3	09:24	16,48	23,40	24,10
5	09:26	16,42	23,40	23,80
10	09:31	16,34	23,40	24,40
20	09:41	16,20	23,40	24,10
30	09:51	16,10	23,40	24,10
60	10:21	15,91	23,50	24,10
120	11:21	15,80	23,60	24,10
180	12:21	15,79	23,80	23,70
240	14:21	15,80	23,80	23,70

Tabela 8.3.4 - Continuação				
Décimo Deslocamento (5,0 kPa)				
Tempo (min)	Hora	Leitura Bureta	T°C-Q	T°C-A
0	14:24	15,80	23,80	23,70
1	14:25	15,79	23,80	23,70
3	14:27	15,74	23,80	23,80
5	14:29	15,70	23,80	23,80
10	14:34	15,61	23,80	23,60
20	14:44	15,48	23,80	24,00
30	14:54	15,40	23,80	24,00
60	15:24	15,19	23,80	24,00
120	16:24	15,08	23,80	23,60
180	17:24	15,04	23,90	24,30
240	18:24	15,06	23,90	23,70
300	19:24	15,09	23,90	23,70

“Assim também vós, depois de terdes feito tudo o que vos foi ordenado, dizei: Somos servos como quaisquer outros; fizemos o que devíamos fazer.”

Lucas 17:10