



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

“JULIO DE MESQUITA FILHO”

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS E CIÊNCIAS EXATAS



Trabalho de Conclusão de Curso

Curso de Graduação em Geologia

ESTUDO DA INTRUSÃO DE VAPORES PROVENIENTES DE SOLOS
LATERÍTICOS CONTAMINADOS COM LÍQUIDO NÃO AQUOSO MENOS DENSO
QUE A ÁGUA (LNAPL).

Gabriel Cardoso Leite

Prof. Dr. Chang Hung Kiang

Rio Claro (SP)

2019

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Instituto de Geociências e Ciências Exatas

Câmpus de Rio Claro

GABRIEL CARDOSO LEITE

ESTUDO DA INTRUSÃO DE VAPORES PROVENIENTES
DE SOLOS LATERÍTICOS CONTAMINADOS COM
LIQUIDO NÃO-AQUOSO MENOS DENSO QUE A ÁGUA
(LNAPL).

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Instituto de Geociências e
Ciências Exatas - Câmpus de Rio Claro, da
Universidade Estadual Paulista Júlio de
Mesquita Filho, para obtenção do grau de
Geólogo.

Rio Claro - SP

2019

L533e

Leite, Gabriel Cardoso

Estudo da intrusão de vapores provenientes de solos lateríticos contaminados com líquido não-aquoso menos denso que a água (LNAPL). / Gabriel Cardoso Leite. -- , 2019

104 f. : il., tabs., fotos + 1 CD-ROM

Trabalho de conclusão de curso (-) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências Farmacêuticas, Araraquara, Orientador: Chang Hung Kiang

1. Geologia. 2. Solo Laterítico. 3. Intrusão de Vapores. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Ciências Farmacêuticas, Araraquara. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

GABRIEL CARDOSO LEITE

ESTUDO DA INTRUSÃO DE VAPORES PROVENIENTES
DE SOLOS LATERÍTICOS CONTAMINADOS COM
LIQUIDO NÃO-AQUOSO MENOS DENSO QUE A ÁGUA
(LNAPL).

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas -
Câmpus de Rio Claro, da Universidade
Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, para
obtenção do grau de Geólogo.

Comissão Examinadora

Prof. Dr. Chang Hung Kiang (orientador)

Engº Miguel Angel Alfaro Soto

Engº Hernan Roni da Silva Filho

Rio Claro, 11 de Julho de 2019

Gabriel Leite

Assinatura do aluno



Assinatura do orientador

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais, que permitiram que toda a trajetória da minha graduação se tornasse possível.

Agradeço aos amigos que fiz na graduação, que tornaram tudo mais leve e descontraído.

Agradeço a Natalia Campos da Silva, por dividir comigo o espaço do laboratório e compartilhar muitas das análises e conhecimento sobre o assunto envolvido neste trabalho.

Devo um agradecimento especial a Miguel Angel Alfaro Soto, por toda a paciência e compreensão ao me elucidar todas as questões envolvendo intrusão de vapores.

O Professor Dr. Chang Hung Kiang foi uma pessoa primordial para a conclusão do trabalho, concedendo-me acesso às dependências dos laboratórios e me auxiliando com todas as questões envolvidas. A ele devo um agradecimento especial.

Agradeço muito também ao Eng. Hernan Roni da Silva Filho e aos estagiários Guilherme Faleiro Silva Campos e Luis Gustavo Lourenzon pela ajuda imprescindível nas análises feitas no laboratório.

RESUMO

A intrusão de vapores provenientes do solo em ambientes fechados pode trazer sérios riscos à saúde humana. No Brasil, o modelo utilizado para quantificação da concentração de vapores em ambiente fechado baseia-se no modelo norte americano (JOHNSON & ETTINGER, 1991), o qual foi desenvolvido em solos com distribuição de poros unimodal. No entanto, os solos brasileiros apresentam muitas vezes características lateríticas, principalmente na distribuição do tamanho de poros que pode ser bimodal ou multimodal. Nesse contexto, o presente estudo apresenta a análise da intrusão de vapores de três diferentes gases do grupo BTEX (Benzeno, Tolueno e m-Xileno), em quatro valores de umidade volumétrica do solo diferentes, em solos bimodais com ajustes uni e bimodais, através do modelo proposto por Johnson & Ettinger (1991) e Alfaro Soto & Chang (2016), respectivamente. Para esse objetivo, foram realizados ensaios laboratoriais de caracterização física e de determinação analítica das curvas de retenção da água em solos com diferentes tipos de distribuição de poros bimodais e a suposição de um modelo conceitual de intrusão de vapor em ambiente fechado, com valores de entrada baseados em métodos empíricos e recomendados pelos autores do modelo adotado. Os resultados mostraram que, para o modelo conceitual analisado, o ajuste unimodal em solos com distribuição de poros bimodal, em geral, pode levar a uma superestimativa de mais de 50% no valor da concentração final dos gases, o que poderia conduzir a erros significativos nas análises de intrusão de vapores em ambientes fechados a partir de solos lateríticos, tal como os predominantes no Brasil.

Palavras-chave: Intrusão de vapores. Solo laterítico. Distribuição de poros bimodal e unimodal. Curvas de retenção de água em solo. BTEX. Benzeno. Tolueno. Xileno.

ABSTRACT

Vapor Intrusion can pose serious risks to human health. In Brazil, the model used to quantify the concentration of vapors in the closed environment is based on the North American model (JOHNSON & ETTINGER, 1991), which was developed in soils with unimodal pore distribution. However, Brazilian soils often present lateritic characteristics, mainly in the distribution of pore size that can be bimodal or multimodal. In this context, the present study presents the analysis of the vapor intrusion of three different gases of the BTEX group (Benzene, Toluene and m-Xylene) in four different values of soil volumetric humidity, in bimodal soils with uni and bimodal adjustments, considering the model proposed by Johnson & Ettinger (1991) and Alfaro Soto & Chang (2016), respectively. For this purpose, laboratory tests of physical characterization and analytical determination of the water retention curves in soils with different types of bimodal pore-size distribution were carried out and the assumption of a conceptual model of vapor intrusion in a closed environment with input values based on empirical methods and recommended by the authors of the adopted models. The results showed that, for the conceptual model analyzed, the unimodal adjustment in soils with bimodal pore distribution, in general, can lead to an overestimation of more than 50% in the value of the final gas concentration, which could lead to significant errors in the analysis of vapor intrusion in closed environments from lateritic soils, such as those predominant in Brazil.

Key-words: Vapor Intrusion. Lateritic soil. Bimodal and Multimodal pore-size distribution. Water retention curves. BTEX. Benzene. Toluene. Xylene.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Fonte de contaminação industrial em VOC's pode gerar problemas relacionados à contaminação da água subterrânea e intrusão de vapores em residências próximas. Retirado de Cernansky (2016).....	12
Figura 2: isolinhas de pressão em subsuperfície considerando-se o nível d'água a oito metros de profundidade e duas rachaduras no piso da casa em locais diferentes: à esquerda, rachadura se encontra na extremidade da casa e à direita, no centro. O fluxo de vapor para dentro da residência é de 4L/min no primeiro caso e 2L/min no último caso. Retirado de EPA (2012).	14
Figura 3: Vista de satélite com localização do afloramento na cidade de Rio Claro – SP. Fonte: Google Earth. Acesso dia 28/09/2018 as 15h31.....	19
Figura 4: Vista geral do afloramento no qual as amostras foram retiradas. Foto: Natália Campos da Silva.	19
Figura 5: Detalhe do procedimento para coleta de amostra indeformada. Foto: Gabriel Cardoso Leite.....	21
Figura 6: Fator de correção K para transformação dos valores obtidos de pw em diferentes temperaturas para uma mesma temperatura de 20 °C. Retirado de NOGUEIRA (2005).	25
Figura 7: Ensaio de Granulometria Conjunta realizada no RAIH. Foto: Guilherme Faleiro Silva Campos.....	27
Figura 8: Detalhe dos tensiômetros (long e short) ligados ao corpo do aparelho HYPROP. Retirado de https://www.ffi.nz/product/hyprop-2/ . Acesso em 29/03/2019 as 22h44. .	30
Figura 9: Suporte montado com mangueiras de silicone onde os tensiômetros são encaixados. Foto: Gabriel Leite.....	31
Figura 10: ensaio através do método de evaporação HYPROP em andamento. Foto: Gabriel Leite.	32
Figura 11: curva de retenção de água no solo e seus elementos (FREUDLUND et al, 1994). Θ_s representa o teor de umidade volumétrica de saturação para a curva obtida pelo processo de secagem e θ_r , representa o teor de umidade volumétrica residual.....	34
Figura 12: perfil esquemático do equipamento utilizado. (SCHINDLER et al, 2010). .	43
Figura 13: modelo conceitual da área de estudo. Retirado de http://www.pineng.com/new-blog-3/2016/3/7/vapor-intrusion . Acesso dia 04/06/2019 as 16:42 horas.	54

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1: Síntese dos dados estruturais do modelo conceitual de ambiente fechado.....	55
Tabela 2: Índices físicos dos Solos obtidos em laboratório. Os índices físicos referentes ao Solo 3 foram retirados de Alfaro Soto et al (2004).....	56
Tabela 3: distribuição granulométrica do Solo 1 obtida em laboratório.	58
Tabela 4: Resultados da análise granulométrica do Solo 2.	60
Tabela 5: Resultados da análise granulométrica do Solo 3. Retirado de Alfaro Soto et al. (2015).	62
Tabela 6: Análise granulométrica do Solo 4 obtida em laboratório.....	64
Tabela 7: Parâmetros de ajuste para a curva de retenção do Solo 1, obtidos pelo software online SWRC Fit.	69
Tabela 8: Parâmetros de ajuste para a curva de retenção do Solo 2, obtidos pelo software online SWRC Fit.	70
Tabela 9: Parâmetros de ajuste para a curva de retenção do Solo 3, retirado de Alfaro Soto et al. (2015).....	71
Tabela 10: Parâmetros de ajuste para a curva de retenção do Solo 4, obtidos pelo software online SWRC Fit.	72
Tabela 11: Dados químicos de entrada para o modelo de Johnson & Ettinger (1991) e Alfaro Soto & Chang (2016).	100
Tabela 12: Dados de entrada dos Solos utilizados no presente estudo, a partir do modelo de Johnson & Ettinger (1991) e Alfaro Soto & Chang (2016).....	101

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Curva de retenção obtida para o Solo 1. As linhas vermelhas contínuas indicam os valores de umidade escolhidos para o cálculo da concentração final de vapores. Ressalta-se que a maior diferença de sucção entre os ajustes unimodais e bimodais se dá no ponto de umidade 0,245; no qual a diferença de sucção é de 143 cm.....	52
Gráfico 2: Gráfico de granulometria do Solo 1 (Formação Rio Claro modificada).....	57
Gráfico 3: Gráfico de granulometria do Solo 2.....	59
Gráfico 4: Gráfico de granulometria do Solo 3. Retirado de Alfaro soto et al. (2015)..	61
Gráfico 5: Gráfico de granulometria do Solo 4, obtido em laboratório.....	63
Gráfico 6: Curva de retenção para o Solo 1, através de método direto (método de evaporação HYPROP) e métodos indiretos (Van Genuchten e Durner).....	65
Gráfico 7: Curva de retenção obtida para o Solo 2. A curva do modelo de Van Genuchten (1980) não se encontra visível pois está exatamente sobreposta pela curva do modelo de Durner (1994).....	66
Gráfico 8: Curva de retenção para o Solo 3 (Formação Rio Claro), retirada de Alfaro Soto et al (2015).....	67
Gráfico 9: Curva de retenção obtida para o Solo 4.....	68
Gráfico 10: gráfico de distribuição de tamanho de poros versus sucção para o Solo 1.	73
Gráfico 11: gráfico de distribuição de tamanho de poros versus sucção para o Solo 2.	74
Gráfico 12: gráfico de distribuição de tamanho de poros versus sucção para o Solo 3. Retirado de Alfaro Soto et al. (2015).....	75
Gráfico 13: gráfico de distribuição de tamanho de poros versus sucção para o Solo 4.	76
Gráfico 14: variação da concentração final de Benzeno em ambiente fechado para o Solo 1.....	77
Gráfico 15: variação da concentração final de Benzeno em ambiente fechado para o Solo 4.....	78
Gráfico 16: variação da concentração final de Tolueno em ambiente fechado para o Solo 1.....	79
Gráfico 17: variação da concentração final de Tolueno em ambiente fechado para o Solo 4.....	79
Gráfico 18: variação da concentração final de Xileno em ambiente fechado para o Solo 1.....	80
Gráfico 19: variação da concentração final de Xileno em ambiente fechado para o Solo 4.....	80
Gráfico 20: variação da concentração dos gases BTEX em ambiente fechado para o modelo unimodal do Solo 1.....	81
Gráfico 21: variação da concentração dos gases BTEX em ambiente fechado para o modelo unimodal do Solo 4.....	81
Gráfico 22: variação da concentração final de Benzeno em ambiente fechado para o Solo 1.....	82
Gráfico 23: variação da concentração final de Benzeno em ambiente fechado para o Solo 4.....	83
Gráfico 24: variação da concentração final de Tolueno em ambiente fechado para o Solo 1.....	83

Gráfico 25: variação da concentração final de Tolueno em ambiente fechado para o Solo 4.....	84
Gráfico 26: variação da concentração final de Xileno em ambiente fechado para o Solo 1.....	85
Gráfico 27: variação da concentração final de Xileno em ambiente fechado para o Solo 4.....	85

SUMÁRIO

Sumário

1. Introdução.....	11
2.0 Objetivos.....	16
3.0 Justificativa.....	17
4.0 Materiais e Métodos	18
4.1 Métodos Experimentais	18
4.1.1 Revisão Bibliográfica	18
4.1.2 Amostragem.....	18
4.1.3 Caracterização do Material Utilizado	21
4.1.3.1 Ensaio para Determinação do Teor de Umidade Natural (w).	22
4.1.3.2 Massa Específica dos Sólidos (ρ).	23
4.1.3.3 Ensaio de Granulometria Conjunta.....	25
4.1.3.4 Preparação da Amostra para Ensaio HYPROP.	27
4.1.3.5 Método de Evaporação HYPROP.	28
4.1.3.5.1 Refilagem.	29
4.1.3.5.2 Ensaio de Evaporação HYPROP	31
4.2 Métodos Teóricos.	33
4.2.1 Curva de Retenção de Água no Solo.	33
4.2.2 Modelo de Arya & Paris para Determinação da Curva de Retenção de Água no Solo.....	37
4.2.3 Condutividade Hidráulica no Solo	40
4.2.4 Método de Evaporação HYPROP.	42
4.2.5 Estimativa da Concentração de Vapores em Ambientes Fechados.	44
4.3 Modelo Conceitual da Área de Estudo.	53
5.0 Resultados e Discussão.....	56
5.1 Caracterização Física e Hidráulica dos Materiais Utilizados	56
5.1.1 Índices Físicos.	56
5.1.2 Curvas Granulométricas.	57
5.1.3 Curvas de Retenção e Condutividade Hidráulica Não saturada.	65
5.2 Estimativa da Concentração de vapores em Ambientes Fechados.....	76
5.2.1 Estimativa da Concentração de Vapores em Fonte Localizada a 1,5 Metros de Profundidade.....	77

5.2.2 Estimativa da Concentração de Vapores em Fonte Localizada a 0,75 Metros de Profundidade.....	82
6.0 Conclusões.....	88
7.0 Referências bibliográficas.	90
8.0 Anexo I: Tabela de Dados Químicos dos Contaminantes Gasosos.....	100

1. Introdução

A agência de proteção ambiental dos Estados Unidos (US EPA) define intrusão de vapores como a migração de compostos contaminantes em fase de vapor através do solo ou através de condutos, como encanamentos e linhas de esgoto subterrâneos e sua consequente intrusão em prédios e construções. (EPA, 2002). Uma vez atingida a superfície existe a preocupação com a saúde humana. Estudos recentes publicados por EPA (2012); Aschengrau et al (2011; 2015) e Chiu et al (2013), por exemplo, mostram que a exposição prolongada à vapores tóxicos é associada a inúmeros impactos nas funções cognitivas e motoras, diferentes tipos de câncer, comprometimento do fígado e rim, além de danos diversos no sistema imunológico.

O processo de intrusão de vapores ocorre quando há, primariamente, uma fonte de contaminação em substâncias com o potencial de formar vapores em subsuperfície, o que pode incluir: compostos orgânicos voláteis (VOC's), como tricloroetileno e benzeno; alguns compostos orgânicos semivoláteis, como o naftaleno; mercúrio; pesticidas e bifenilos. (EPA, 2017).

Nesse âmbito, os compostos são divididos em dois grandes grupos, que diferem substancialmente na sua forma de migração em subsuperfície e em seus parâmetros físicos. Tratam-se dos líquidos não aquosos menos densos que a água ou *light non-aqueous phase liquid* (LNAPL) e os líquidos não aquosos mais densos que a água ou *dense non-aqueous phase liquid* (DNAPL). Essa divisão é muito importante, pois seus mecanismos de transporte são diferenciados influenciando no deslocamento e profundidade da contaminação que poderá atingir equilíbrio de potenciais acima, abaixo ou no mesmo nível da água subterrânea. Adicionalmente, estes dois grupos de compostos apresentam processos de biodegradação distintos: enquanto o primeiro, objeto do presente estudo, degrada-se em processos aeróbicos, o último degrada-se através de processos biológicos anaeróbicos, sendo que ambos os processos

ocorrem através de atividade bacteriana, fato que permite uma díspar intensidade de biodegradação e atenuação dos efeitos nocivos da intrusão de vapores à saúde humana. (EPA, 2012).

As potenciais fontes de contaminação são, em geral, zonas industriais, zonas militares, lavanderias a seco e postos de gasolina. A contaminação se dá quando há vazamentos acidentais de compostos provenientes desses locais, que percolam no solo e atingem o nível d'água subterrânea, podendo assim ser transportados pelo fluxo da água ali presente (CERNANSKY, 2016). A figura 1 ilustra uma contaminação do solo e lençol freático por compostos orgânicos voláteis (VOC's) provenientes de uma indústria.

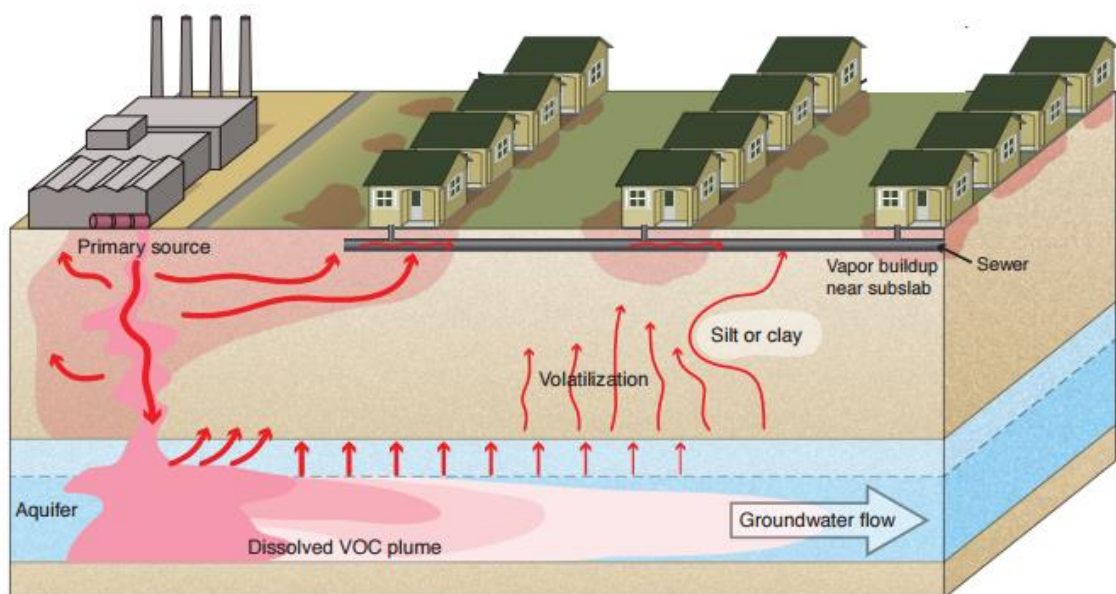


Figura 1: Fonte de contaminação industrial em VOC's pode gerar problemas relacionados à contaminação da água subterrânea e intrusão de vapores em residências próximas. Retirado de Cernansky (2016).

Ainda no contexto da figura, o processo de volatilização dos compostos presentes no solo e água subterrânea é responsável por gerar contaminantes que, outrora líquidos, também se encontram na forma de vapor no solo. A volatilização é considerada uma propriedade específica de cada composto, e compostos altamente voláteis, como a gasolina ou VOC's são mais

propensos a se particionar em vapor em condições normais de temperatura e pressão. A volatilização é, portanto, o processo primordial necessário para geração de vapores no solo. A posterior migração dos vapores no solo, de forma ascendente, se dá a partir dos processos denominados difusão e advecção (EPA, 2012).

O processo de migração de vapores por difusão molecular ocorre quando há diferenças nas concentrações do composto no solo, fazendo com que eles migrem de uma zona de maior concentração em direção a uma zona de menor concentração, o que normalmente representa a migração dos compostos presentes na zona saturada em direção à zona vadosa (ou zona não saturada) acima. Tal processo também ocorre na zona saturada, porém os coeficientes do modelo de difusão em zona saturada são aproximadamente dez mil vezes menores que os coeficientes de difusão no ar (compostos em fase de vapor), ou seja, a difusão em zona vadosa é muito mais eficiente que a difusão em zona saturada. Portanto, em subsuperfície longe de construções o processo dominante de transporte de vapores é a difusão molecular (EPA, 2012).

A advecção, por sua vez, passa a ser dominante em áreas adjacentes a construções. Ela ocorre quando há diferenças de pressão entre o solo contendo contaminantes na forma de vapor e as áreas proximais, o que normalmente se configura em solos próximos a construções. A pressão do ar dentro de uma casa, por exemplo, pode ser maior ou menor que a pressão do vapor no solo, e mesmo que as pressões sejam pouco diferentes, os fluxos advectivos para dentro ou fora da casa já são gerados, podendo fazer com que os contaminantes gasosos entrem na residência através de fendas no chão, poros no piso, rachaduras, encanamentos e etc. As diferenças de pressão podem ser causadas ou ampliadas por diferenças na temperatura entre os dois ambientes, fluxos de vento dentro da casa ou o funcionamento de dispositivos mecânicos, como ar condicionado, aquecedores e exaustores, por exemplo. Essas diferenças de pressão são mais significativas em um raio de dois metros de interferência para fora da construção, mas medidas consideráveis para influência na advecção já foram tomadas com até cinco metros de distância da construção (NAZAROFF et al, 1987). As diferenças de pressão em subsuperfície obedecem a um padrão simétrico de distribuição caso o solo seja considerado inteiramente

homogêneo, como mostra a figura 2, onde o fluxo de gás é perpendicular às linhas de contorno da pressão em subsuperfície.

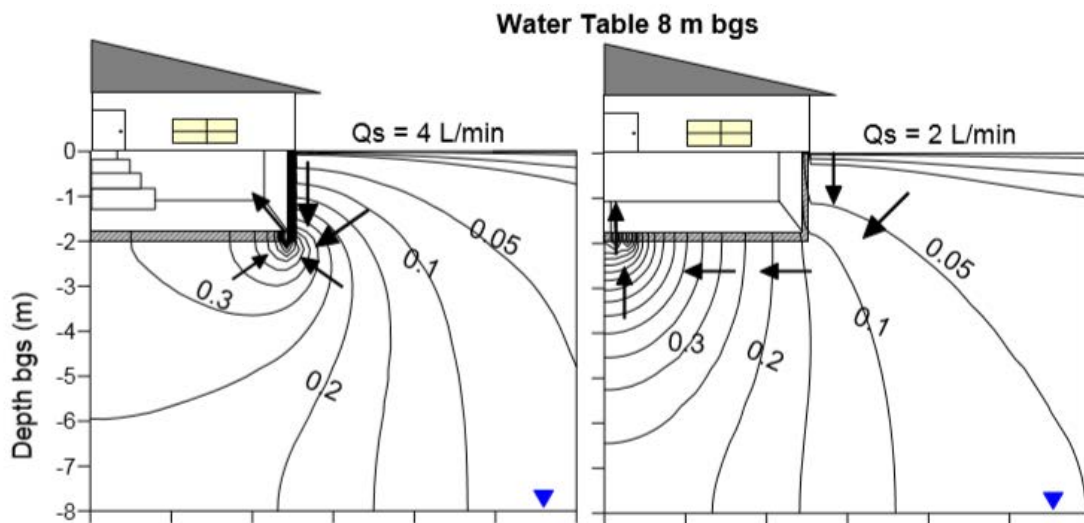


Figura 2: isolinhas de pressão em subsuperfície considerando-se o nível d'água a oito metros de profundidade e duas rachaduras no piso da casa em locais diferentes: à esquerda, rachadura se encontra na extremidade da casa e à direita, no centro. O fluxo de vapor para dentro da residência é de 4L/min no primeiro caso e 2L/min no último caso. Retirado de EPA (2012).

Existem ainda outros dois fatores primários, além da difusão e advecção, que governam o regime de transporte de vapores no solo: o particionamento dos contaminantes e a sua degradação. O particionamento refere-se aos processos que fazem com que o contaminante se distribua na forma gasosa, na forma dissolvida nos poros do solo preenchidos com água e na forma sorvida mais próxima à superfície, fazendo com que os vapores se distribuam com maior eficiência no solo, mas retardando o processo de intrusão de vapores. Já a degradação dos contaminantes ocorre por atividade bacteriana, responsável por gerar compostos menos danosos à saúde humana (EPA, 2012).

Outros parâmetros que podem influenciar o transporte de vapores em subsuperfície são a porosidade e permeabilidade do solo, concentração do contaminante (quando dissolvido em água) e coeficiente de carbono orgânico no solo. Estes parâmetros, entre outros, são dados de

entrada do modelo desenvolvido por Johnson & Ettinger (1991), o qual é utilizado até hoje para estimar o transporte de contaminantes em fase de vapor, tanto na forma difusiva quanto convectiva, com fonte localizada no solo e/ou água subterrânea. O modelo permite que se estime analiticamente, de forma unidimensional, o transporte de vapores em subsuperfície, predizendo com certa precisão o grau de contaminação por vapores que os edifícios próximos à fonte da contaminação apresentam. (LOUREIRO et al, 1990). No entanto, com relação às propriedades do solo, o modelo desenvolvido por Johnson & Ettinger (1991) considera, entre outros fatores, as funções que descrevem as curvas de pressão capilar em análises quantitativas com equações aplicáveis para meios porosos cuja distribuição de poros seja unimodal. Todavia, solos inalterados no Brasil apresentam geralmente, distribuição de poros multimodais, típicos de solos lateríticos, com características e propriedades mecânicas e hidráulicas diferenciadas, o que sugere que a utilização dos modelos tradicionais para previsão das concentrações de vapores no ambiente fechado em superfície não seja apropriada nesse tipo de solo (ALFARO SOTO & CHANG, 2016).

Dessa forma, é imprescindível que o modelo de transporte de vapores seja adequado aos diferentes tipos de solo com o intuito de minimizar o erro das análises. Alfaro Soto & Chang (2016) compararam os resultados previstos das concentrações de contaminantes na forma de vapor em ambiente fechado através do modelo de Johnson & Ettinger (1991) e o mesmo modelo, porém modificado para solos cuja distribuição de poros seja multimodal. Os resultados obtidos, mostraram erros da ordem de 200 a 600%.

Diante dessa problemática, este trabalho visa verificar a adequabilidade dos modelos tradicionais quando utilizados em solos lateríticos, bem como testar novos modelos de intrusão de vapor para solos com distribuição de poros multimodal, além de prescrever com maior precisão o risco associado à saúde humana, uma vez que a mudança de concentração dos vapores em ambientes fechados é regida pela mecânica de transporte desses em subsuperfície.

2.0 Objetivos

Esta pesquisa tem como objetivo principal a análise e descrição do comportamento de contaminantes a base de hidrocarbonetos em fase de vapor em subsuperfície, sobre solos com distribuição de poros multimodais (solos lateríticos).

Uma das ferramentas fundamentais para a correta descrição do comportamento hidráulico de contaminantes em subsuperfície é a determinação das curvas de retenção e condutividade hidráulica do solo em zona não-saturada. Para a determinação direta desses valores, será empregado o método de evaporação no sistema de medidas HYPROP. Tal método, que será abordado com maior detalhamento no capítulo Materiais e Métodos, permite a tomada de valores associados as propriedades hidráulicas do solo de forma automatizada. Muitos estudos feitos através deste método e comparando-o com os valores reais medidos para as mesmas propriedades hidráulicas mostram que o sistema de medidas HYPROP apresenta boa precisão. (Modificado de BEZARRA-COELHO et al, 2018). Além disso, será utilizado o método indireto de Arya & Paris (1981), que leva em consideração as curvas granulométricas para a obtenção da curva de retenção de água.

Assim sendo, o presente estudo tem como objetivos específicos:

- Síntese de solo com granulometria desejada a partir de modelos de solos lateríticos com distribuição de poros multimodais.
- Análise de curvas granulométricas com distribuição de poros multimodais.
- Análise comparativa dos resultados de concentração de contaminantes em solos com distribuição de poros unimodais e multimodais.
- Análise da adequação do modelo teórico para intrusão de vapores em solos unimodais e multimodais.

3.0 Justificativa

A determinação da curva de retenção de água no solo é uma das variáveis mais importantes para previsão do comportamento de contaminantes em subsuperfície. Modelos tradicionais de determinação da curva de retenção de água no solo, como por exemplo os modelos desenvolvidos por Van Genuchten (1980) e Johnson & Ettinger (1991) tem sua modelagem embasada em conceitos fortemente empíricos, e foram realizados com solos que diferem essencialmente de solos tropicais (Modificado de BACCHI, 1993).

Estes modelos consideram, entre outros fatores, que o transporte de contaminantes é realizado em solos com distribuição de poros unimodal, o que não corresponde à realidade dos solos tropicais.

Os solos tropicais, presentes no Brasil, têm a lixiviação como processo genético mais atuante, dando-lhes características peculiares em relação a outros solos, como a alta porosidade com diferentes tipos de poros. (BONDER, 2008). Isso faz com que as predições do transporte de contaminantes em fase de vapor no solo através dos modelos tradicionais apresentem um grau de incerteza considerável. Mallants et al (1996) pôde apontar diversos autores (SMETTEN & KIRKBY, 1990; OTHMER et al, 1991; DURNER, 1994) que mostraram erros de mais de 30% na previsão da curva de retenção aplicando os modelos tradicionais em solos com distribuição de poros multimodal (ALFARO SOTO & CHANG, 2013). Além disso, a literatura acadêmica carece de registros de estudos feitos para adaptação dos modelos desenvolvidos por Johnson & Ettinger (1991) em solos tropicais.

Dessa forma, o presente estudo se faz de significativa importância para avaliação do uso de métodos tradicionais (unimodais) e multimodais para previsão de concentrações dos contaminantes em ambientes fechados na superfície (intrusão de vapores em edificações) a partir de solos lateríticos contaminados com hidrocarbonetos.

4.0 Materiais e Métodos

4.1 Métodos Experimentais

Os métodos experimentais do presente trabalho estão sequenciados de acordo com a ordem cronológica, a ver:

4.1.1 Revisão Bibliográfica

Esta primeira etapa compreendeu a revisão de artigos científicos, dissertações de mestrado, teses de doutorado e trabalhos de conclusão de curso acerca dos temas: (1) formação Rio Claro e solos lateríticos, (2) solos com distribuição de poros unimodal ou multimodal, (3) propriedades hidráulicas dos solos de acordo com o tamanho de seus poros, (4) base teórica do conceito de intrusão de vapores em LNAPL's e (5) teoria e consequências da intrusão de vapores para a saúde humana.

4.1.2 Amostragem

As amostras utilizadas no presente estudo foram coletadas em afloramento próximo ao campus da UNESP de Rio Claro – SP, localizada no interior do estado de São Paulo. (Figura 3). Mais precisamente, o afloramento localiza-se sob as coordenadas E 238109 e N 7521759, com cota de 598 metros. (Figura 4).



Figura 3: Vista de satélite com localização do afloramento na cidade de Rio Claro – SP. Fonte: Google Earth. Acesso dia 28/09/2018 as 15h31.



Figura 4: Vista geral do afloramento no qual as amostras foram retiradas. Foto: Natália Campos da Silva.

A amostragem foi feita com o auxílio de uma enxada. O solo foi escavado até 30 centímetros de profundidade, e as amostras indeformadas foram coletadas e armazenadas em sacos plásticos posteriormente lacradas, identificadas e encaminhadas ao laboratório (RAIH – Laboratório de Estudos de Áreas Impactadas por Hidrocarbonetos –pertencente ao LEBAC – Laboratório de Estudos de Bacias – da UNESP do campus de Rio Claro).

As amostras indeformadas foram coletadas com auxílio de um extrator de amostras, dois anéis de material metálico, martelo e espátula. Foram coletadas duas amostras indeformadas, cravando-se o anel ao solo com o extrator de amostras e auxílio do martelo, depois foi necessário à retirada do solo em volta do anel com a espátula, para assim obter a amostra indeformada, que também foi levada ao laboratório. Procedeu-se desta maneira para que não houvesse a interferência de alguma alteração no solo causada pela cobertura superficial.



Figura 5: Detalhe do procedimento para coleta de amostra indeformada. *Foto: Gabriel Cardoso Leite.*

4.1.3 Caracterização do Material Utilizado

O material utilizado nos ensaios do presente estudo pertence à Formação Rio Claro, e é descrito como um solo residual maduro, arenoso com pouca argila, coloração rosado a avermelhado claro e classificado como Latossolo vermelho-amarelo (LEVANTAMENTO PEDOLÓGICO SEMIDETALHADO DO ESTADO DE SÃO PAULO, 1984).

Através do solo coletado da Formação Rio Claro, foram produzidas três curvas granulométricas, denominadas Curva 1, Curva 2 e Curva 3 (que serão descritas no item 4.1.3.3).

Porém, além da caracterização da textura deste solo, a granulometria foi utilizada na obtenção indireta da curva de retenção por modelos matemáticos (ARYA & PARIS, 1981). No entanto, trabalhos de Alfaro Soto & Chang (2015) têm mostrado que, devido a suas características, este tipo de solo produziria bimodalidade acentuada em altas pressões capilares (acima de 10.000 cm de coluna de água). Por esse motivo, além das granulometrias características da Formação Rio Claro, foram realizadas misturas dos solos de esta formação com areia limpa, em proporções que garantissem a obtenção de curvas granulométricas e conseqüentemente, curvas de retenção cuja bimodalidade seja acentuada, em baixas pressões capilares.

Adicionalmente, tanto os solos naturais como obtidos por mistura foram submetidos aos ensaios laboratoriais de caracterização física para determinação dos índices físicos como umidade natural (w), massa específica (ρ) e massa específica seca (ρ_d), além da determinação das curvas de retenção de água utilizando-se as amostras indeformadas com o método de evaporação HYPROP e métodos indiretos.

4.1.3.1 Ensaio para Determinação do Teor de Umidade Natural (w).

Este ensaio, descrito pela norma NBR 6457/86 tem como objetivo determinar a massa de água contida no solo amostrado. Para isso, foi necessário que porções representativas do solo em questão fossem acondicionadas em cápsulas de alumínio recém pesadas e enumeradas. Assim, as pesagens das cápsulas contendo solo com umidade natural e depois de secas em estufa (110 graus Celsius durante 12 horas) permitiram o cálculo da umidade do solo de acordo com a expressão a seguir. Os resultados são expressos em porcentagem do peso relativo de água contido na amostra:

$$W = M_w / M_{ss} \quad (01)$$

Onde: $M_w = M_{su} - M_{ss}$

M_w = massa de água

M_{su} = massa do solo úmido (Solo + água + cápsula)

M_{ss} = massa do solo seco (Solo + Cápsula)

O teor de umidade é representado pela média aritmética dos valores que não diferem em mais de 5% do valor médio calculado.

4.1.3.2 Massa Específica dos Sólidos (ρ).

Os procedimentos de cálculo da massa específica dos sólidos são regidos pela norma NBR 6508/84.

O valor da massa específica, expresso em g/cm^3 , tem relação direta, em um solo, com os minerais que o constituem e o grau de ocorrência de cada um.

Assim sendo, o ensaio se inicia com aproximadamente 100 a 120 gramas de solo seco (umidade pré-determinada conforme o item 4.2.1 acima) previamente peneirada pela malha No 4. A amostra é colocada em um recipiente e saturada por 24 horas, para depois ser homogeneizada mecanicamente por um minuto com ajuda de um dispersor. Logo, a amostra é transferida para um picnômetro e adicionada água destilada até completar a capacidade do picnômetro (500 cm^3). Posteriormente é removido o ar existente nos vazios formados pelo material, através da aplicação de vácuo. O vácuo deve ser aplicado até que não se apareçam mais bolhas na água destilada e no solo. Adicionalmente, um outro picnômetro, contendo também 500ml de água destilada, deve passar pelo processo de deaeração a vácuo concomitantemente. Os dois picnômetros devem então ser levados a geladeira, onde permanecerão por, no mínimo, 24 horas.

Após a retirada dos picnômetros da geladeira, a temperatura da água deve então ser homogeneizada com o auxílio de um termômetro. Devem ser tomadas medidas de temperatura

em três pontos diferentes do picnômetro: na parte superior, central e inferior internas. Tais temperaturas não devem se distanciar mais de 0,5 grau Celsius. Então, são feitas cinco medições de temperatura e suas respectivas massas no conjunto partículas-água, iniciando-se com 15 °C, e então 17,5 °C; 20°C; 22,5°C e 25°C. Caso a amostra perca volume com o passar do tempo, pode-se utilizar um algodão embebido em água destilada, completando-se o volume com um leve gotejamento do algodão. Anotados os valores, o material deve ser transferido para uma vasilha e levado à estufa, para secagem. Determina-se então a massa dos sólidos, que deverá ser aproximadamente igual àquela obtida inicialmente.

A massa específica dos sólidos (ρ) será então calculada através da equação

$$\rho = (M_s - \rho_w) / (M_s - M_1 + M_2) \quad (02)$$

Onde:

M_s = Massa de sólidos medida ao fim do ensaio

M_1 = Massa do conjunto água-picnômetros-sólidos a uma temperatura T (°C).

M_2 = Massa do conjunto água-picnômetros obtido através da curva de calibração de picnômetro em anexo abaixo.

ρ_w = Massa específica da água.

Após o cálculo dos valores de massa específica dos sólidos para cada temperatura, os valores devem ser transformados para a temperatura de 20 °C, através da multiplicação dos valores pelo fator $K = \rho_w(T) / \rho_w(20)$, como mostrado na figura abaixo; e calcular a média aritmética dos valores transformados.

T °C	K	T °C	K	T °C	K
15,0	1,0009	18,5	1,0003	22,0	0,9996
15,5	1,0008	19,0	1,0002	22,5	0,9995
16,0	1,0007	19,5	1,0001	23,0	0,9993
16,5	1,0007	20,0	1,0000	23,5	0,9992
17,0	1,0006	20,5	0,9999	24,0	0,9991
17,5	1,0005	21,0	0,9998	24,5	0,9990
18,0	1,0004	21,5	0,9997	25,0	0,9988

Figura 6: Fator de correção K para transformação dos valores obtidos de p_w em diferentes temperaturas para uma mesma temperatura de 20 °C. Retirado de NOGUEIRA (2005).

Caso existam valores já transformados que se afastem da média mais de 0,020 g/cm³, esses valores devem ser rejeitados. Caso exista mais de uma rejeição, uma nova média deverá ser calculada com os novos valores, e o critério de rejeição verificado novamente.

4.1.3.3 Ensaio de Granulometria Conjunta.

O ensaio de Granulometria Conjunta auxilia na síntese da curva granulométrica, utilizada na classificação textural dos solos, através da obtenção de pares de valores de tamanho da partícula e porcentagem de ocorrência.

O ensaio de granulometria conjunta realizado é regido pela norma da ABNT – MB 32 (NBR 7181), utilizando-se os solos areno-siltosos e areno-argilosos da Formação Rio Claro. O ensaio procedeu-se da seguinte forma:

Cem gramas de solo de massa e umidade conhecida, passante na peneira de malha de 2 mm foi colocado em um reservatório contendo 125 cm³ de solução de hexametáfosfato de sódio

na concentração de 45,7 g de hexametáfosfato de sódio para 1000 cm³ de água destilada. A solução contendo o solo foi deixada em repouso por 12 horas.

Após o intervalo, transferiu-se a amostra para um dispersor para agitação mecânica rotativa durante 10 minutos e, em seguida, o material foi transferido para uma proveta na qual adicionou-se água destilada até completar 1.000 cm³.

O ensaio se iniciou com agitação por 1 minuto com o auxílio de uma haste contendo uma hélice na extremidade. Em seguida, foram realizadas leituras da densidade da solução em intervalos conhecidos (0,5; 1; 2; 4; 8; 15; 30; 60; 120; 240 e 480 minutos) através da leitura de um densímetro previamente introduzido na solução. Após cada leitura, o densímetro foi retirado. Concomitantemente, medidas da densidade e temperatura foram realizadas em outra proveta contendo água destilada, para eventuais correções segundo o método.

Posteriormente à última leitura realizada, prosseguiu-se o ensaio com um peneiramento em via úmida (lavagem) com o uso da peneira de 0,075 mm de abertura. A porção retirada foi levada à estufa até secagem completa para posterior peneiramento mecânico (malhas 10, 16, 30, 50, 100 e 200) e pesagem.

Maiores detalhes sobre os procedimentos e cálculos realizados no ensaio podem ser encontrados em Nogueira (2005).



Figura 7: Ensaio de Granulometria Conjunta realizada no RAIH. Foto: Guilherme Faleiro Silva Campos

4.1.3.4 Preparação da Amostra para Ensaio HYPROP.

O método HYPROP para a obtenção da curva de retenção requer um anel metálico porta amostra onde são inseridos os tensiômetros para monitoramento da pressão capilar e submetido a pesagem sucessiva em balança para determinação da umidade. A preparação da amostra no anel metálico é dividida em duas etapas: a Compactação e a Saturação do solo. Por se tratar de uma preparação, e não um ensaio propriamente dito, estas duas etapas serão divididas apenas em tópicos, neste mesmo capítulo, a ver:

- **Compactação:**

A compactação da amostra dentro do anel metálico se dá através de um compactador hidráulico. Através dele, a amostra assumirá a densidade desejada, também chamada de ρ_d , expressa em g/cm^3 , de acordo com os parâmetros necessários para o ensaio. Como, no presente estudo, o solo amostrado deve se assemelhar às condições naturais de solos tropicais, a densidade utilizada foi de $1,44 \text{ g/cm}^3$, considerada densidade padrão da Formação Rio Claro para este estudo.

O cálculo realizado para se atingir a densidade desejada do solo é feito da seguinte forma: sabendo-se as medidas de raio (r) e altura (h) do cilindro, seu volume pode ser calculado através da fórmula $V = \pi \cdot r^2 \cdot h$. Sabendo-se o volume do cilindro, a massa úmida de solo a ser colocada no anel e compactada (em gramas) é obtida através da simples multiplicação entre o volume calculado do cilindro (em cm^3) e a densidade desejada para a análise (em g/cm^3).

- **Saturação do Solo:**

A etapa seguinte, a saturação do solo, é feita através de um encaixe do solo condicionado no anel metálico em um anteparo, para evitar a perda do solo quando mergulhado na água destilada. O conjunto então é colocado num vasilhame, que é cuidadosamente preenchido com água destilada até a altura aproximada de metade do anel metálico. O conjunto deve ser deixado parcialmente imerso na água até sua completa saturação por capilaridade.

4.1.3.5 Método de Evaporação HYPROP.

Uma das formas de se mensurar as propriedades hidráulicas do solo em sua zona não-saturada (baixas pressões capilares) é através do Método de Evaporação HYPROP. Este capítulo apresentará o método experimental descrito da forma como foi realizado no Laboratório de Remediação de Áreas Contaminadas por Hidrocarbonetos (RAIH) do campus

da UNESP de Rio Claro, visto que até o momento não existe norma regulatória para o ensaio. O ensaio, por efeito de organização, será dividido em dois capítulos distintos, o primeiro chamado de Refilagem e o segundo, Ensaio de Evaporação HYPROP, a ver:

4.1.3.5.1 Refilagem.

O processo denominado refilagem é o primeiro processo pelo qual o equipamento HYPROP deve passar. Este processo tem como principal objetivo permitir o funcionamento correto dos tensiômetros para a realização do ensaio, além de permitir medições mais elevadas e precisas perante as às mudanças de pressão existentes devido à sua alta sensibilidade (resolução de 0,01 hPa).

A refilagem consiste no encaixe dos tensiômetros (*long e short*) e do corpo do aparelho (preenchido com água destilada e deaerada) a uma mangueira ligada diretamente à bomba de vácuo. A bomba deve ser então acionada, e, muito lentamente, a pressão negativa deve ser liberada nos componentes do aparelho. A bomba então é programada para ligar a cada 5 minutos, e permanecer ligada por cerca de 1 minuto, para garantir que a pressão do vácuo seja a mais constante possível. É necessário que se confirme que o sistema inteiro esteja isolado de qualquer vazamento, para não haver perdas na pressão interna.



Figura 8: Detalhe dos tensiômetros (long e short) ligados ao corpo do aparelho HYPROP. Retirado de <https://www.ffi.nz/product/hyprop-2/>. Acesso em 29/03/2019 as 22h44.

Os tensiômetros então serão lentamente preenchidos com água, por conta da pressão exercida pela bomba, e o corpo do aparelho deve registrar valores iguais ou muito próximos de pressão (em hPa) a partir dos seus transdutores (localizado no cabeçal onde os tensiômetros são inseridos) para que o ensaio se inicie. O processo de refilagem do aparelho deve durar o tempo que se achar necessário até que os tensiômetros e o corpo do aparelho não apresentem mais bolhas de ar, o que pode levar de horas a dias.

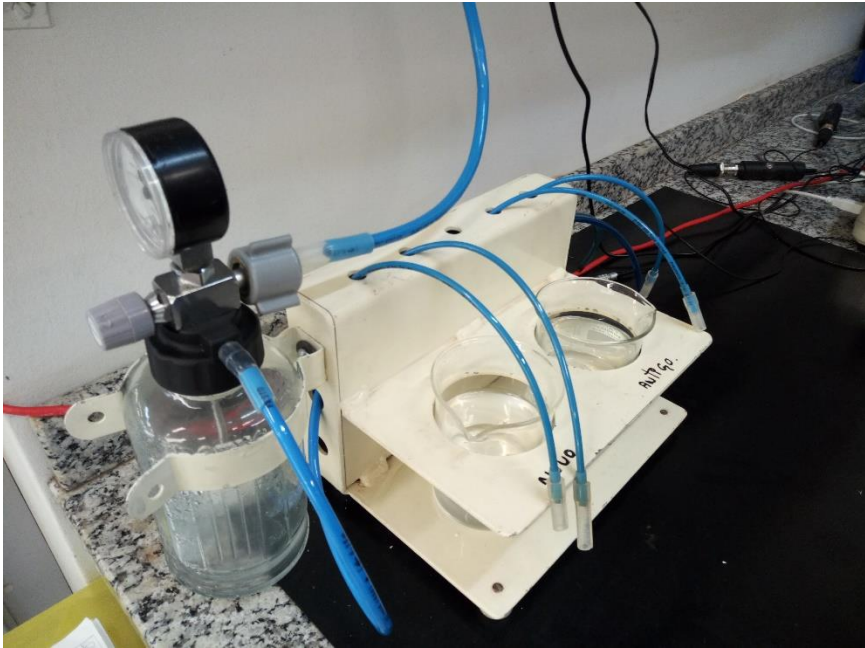


Figura 9: Suporte montado com mangueiras de silicone onde os tensiômetros são encaixados. Foto: Gabriel Leite

4.1.3.5.2 Ensaio de Evaporação HYPROP

O ensaio, propriamente dito, têm como objetivo principal determinar as curvas de retenção e condutividade hidráulica do solo, com o auxílio de dois *softwares* desenvolvidos para o equipamento HYPROP. O primeiro *software*, chamado de HYPROP View, é utilizado durante o ensaio para registro dos dados experimentais; enquanto o segundo *software*, o HYPROP-FIT é utilizado após o ensaio, responsável pelo tratamento de dados e cálculo das curvas de retenção.

O ensaio se inicia com a introdução do solo saturado em água destilada (ver item 4.1.3.4) nos tensiômetros devidamente rosqueados (ver figura 7) na base do equipamento. Todo este conjunto deve estar sobre uma balança de alta precisão, pois os dados de massa de solo medido nas balanças (utilizados para determinação da umidade) e pressão nos tensiômetros (para

medição da sucção matricial) são valores de entrada do *software*, que é ligado aos dois aparelhos.

O *software* então inicia as leituras de pressão dos tensiômetros, que vai lentamente decaindo, conforme as características hidráulicas do solo.

Durante o ensaio, que dura em torno de poucos dias a uma semana (a depender do solo analisado), recomenda-se que o ambiente em torno do aparelho deva ser isolado, para que nenhuma vibração possa interferir nos valores de massa das balanças.

O ensaio acaba quando há pouca ou nenhuma pressão na leitura dos tensiômetros decorrente de ter atingido a capacidade máxima de medição que ocorre após haver descontinuidade na coluna de água (formação de bolhas), processo conhecido como cavitação.



Figura 10: ensaio através do método de evaporação HYPROP em andamento. Foto: Gabriel Leite.

Após o término do ensaio, os dados coletados são armazenados em um arquivo de extensão *.bndx*, que posteriormente é lido através do *software* HYPROP-FIT. Tanto os *softwares* quanto o aparelho são produzidos pela empresa Meter Group®.

4.2 Métodos Teóricos.

Os métodos teóricos envolvidos nos experimentos realizados no presente trabalho estão contidos neste capítulo, a ver:

4.2.1 Curva de Retenção de Água no Solo.

A curva de retenção de água no solo é uma das propriedades mais importante para a previsão do grau de ajuste do modelo de intrusão de vapores em solos unimodais aos solos bimodais presentes no Brasil, visto que o transporte de contaminantes ocorre na zona não saturada até o ambiente fechado.

A curva de retenção de água no solo é uma representação gráfica que relaciona o teor ou o conteúdo de água no solo com a força (tensão) com que ela está retida pelo mesmo, também chamada de potencial mátrico.

Segundo Alfaro Soto (2004), a relação entre o teor de umidade e sucção do solo é uma característica do solo não saturado, podendo ser representada graficamente pela curva de retenção de água no solo. A retenção da água no solo é afetada por uma série de fatores, que vão desde a distribuição relativa do tamanho, da forma e do arranjo das partículas (SALTER & WILLIAMS, 1965; REEVE et al., 1973; SHARMA & UEHARA, 1968) até a composição e concentração de solutos na solução do solo, no caso deste conter argilas expansivas (EL-SWAIFY & HENDERSON, 1967; THOMAS & MOODIE, 1962). Já para Tuller & Or (2005), a textura, estruturação do solo e presença de matéria orgânica também podem afetar a curva de retenção.

Graficamente, essa relação se dá entre a pressão capilar (eixo das abscissas) e a umidade (eixo das ordenadas). A figura 11 representa uma curva típica de retenção, com alguns de seus componentes.

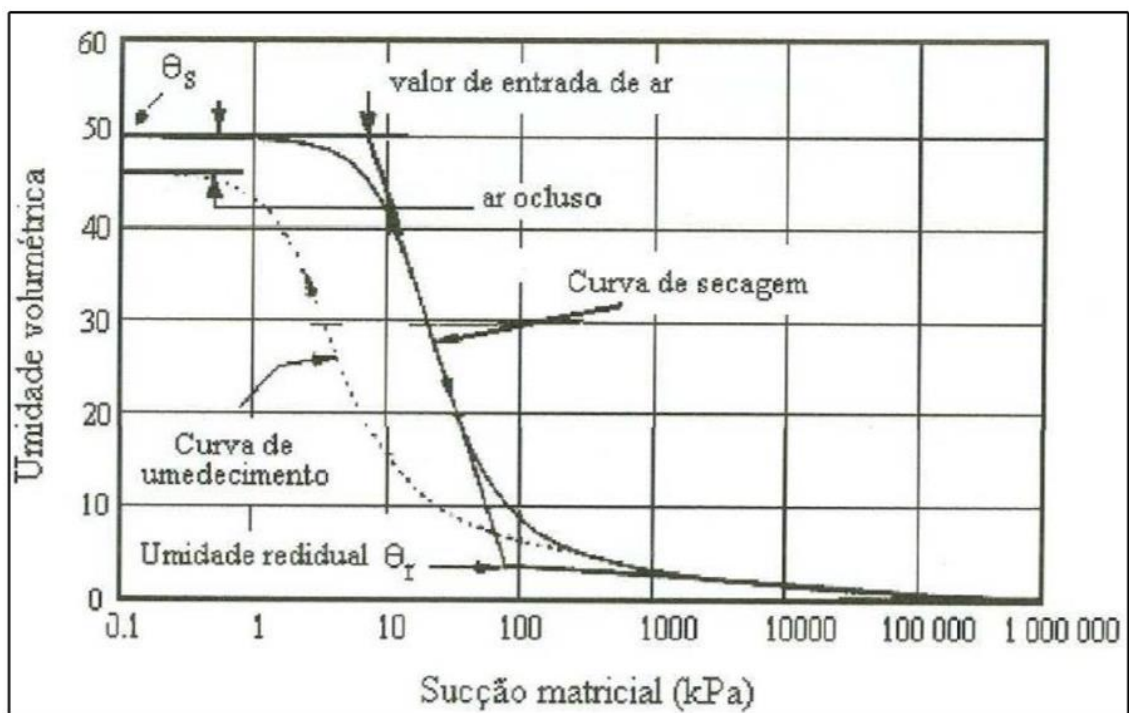


Figura 11: curva de retenção de água no solo e seus elementos (FREUDLUND et al, 1994). θ_s representa o teor de umidade volumétrica de saturação para a curva obtida pelo processo de secagem e θ_r , representa o teor de umidade volumétrica residual.

Um fenômeno muito comum relacionado à curva de retenção é chamado de fenômeno da histerese. Ele se dá pelas diferenças entre as curvas obtidas pelo processo de secagem e umedecimento do solo, pois elas não coincidem. Por este motivo, o método utilizado para a obtenção da curva de retenção de água no solo deve ter parâmetros diferentes quando o solo passa por processo de umedecimento ou secagem. Segundo Alfaro Soto (1999), este fenômeno está relacionado com as irregularidades de poros no solo, repetição sequencial de saturação e drenagem, aprisionamento de bolhas de ar e alterações na estrutura do solo.

Na curva de retenção, a quantidade de água presente pode ser representada pela umidade gravimétrica (w), umidade volumétrica (θ) ou pelo grau de saturação (S_r). As seguintes equações correlacionam os três fatores:

$$\Theta = S_r \cdot n \quad (03)$$

$$\Theta = y_d \cdot w / y_w$$

Onde,

e = índice de vazios

y_d = peso específico seco

y_w = peso específico da água

n = porosidade

Existem diversos modelos propostos com a finalidade de modelar a curva de retenção de água no solo. Entre eles, o modelo de Van Genuchten (1980) é um dos mais utilizados e mais apropriado para solos com distribuição de poros unimodal. O modelo é muito usado na maioria das análises através do método de evaporação HYPROP, que será descrito no capítulo 4.2.4. O modelo de Van Genuchten propõe a descrição matemática da relação funcional entre o teor de água e a sucção do solo da seguinte maneira:

$$S_e = [1 + (\alpha\psi)^n]^{-m} \quad (04)$$

$$\Theta = \left\{ \frac{\theta_s + \theta_r}{[1 + (\alpha\psi)^n]^m} \right\} + \theta_r \quad (05)$$

Onde,

Θ = teor de água do solo [$\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$];

θ_r = teor de água residual medido ou ajustado por regressão [$\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$];

θ_s = teor de água de saturação do solo [$\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$];

S_e = saturação efetiva;

α = parâmetro de ajuste [cm^{-1}];

ψ = sucção [cm];

m e n = parâmetros de ajuste do modelo.

Segundo Alfaro Soto & Chang (2013), a maioria dos solos pode apresentar curvas de retenção com distribuição de poros com caráter unimodal. No entanto, há casos em que a distribuição dos poros pode estar associada a estruturação ou à agregação das partículas do solo e também de processos biológicos (MALLANTS et al., 1997), formando distribuições multimodais nos tamanhos dos poros (ALFARO SOTO et al., 2008) tais como os observados em solos brasileiros por estes e outros autores (MIGUEL et al., 2006; GITIRANA et al., 2015; SOUSA et al., 2016).

Segundo Durner (1994), os modelos tradicionais não são capazes de representar a curva de retenção de água de solos com formação de sistemas de poros secundários, processos de agregação e distribuição específica dos grãos. Alfaro Soto & 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.

A curva de retenção para solos com distribuição de poros bimodal ou multimodal, caso dos solos tropicais, pode ser descrita segundo a expressão de Durner (1994):

$$S_e = \sum_{i=1}^k w_i (1 + |\alpha_i \psi|^{m_i})^{-m_i} \quad (06)$$

Onde,

k = número de subsistemas que formam a distribuição total de poros, ou seja, 2 no caso do presente trabalho;

w_i = fatores designados para os pesos das subcurvas que variam entre 0 e 1, cuja soma deve ser igual a 1.

Ambos os modelos apresentam condicionantes para os valores de α , m e n , da seguinte forma: $\alpha_i > 0$; $n_i > 1$ e $m_i = 1 - 1/n_i$.

No presente trabalho, a partir dos dados obtidos nas análises de laboratório, também serão elaboradas curvas de retenção de água no solo a partir do modelo teórico de Arya & Paris (1981), com o intuito de evidenciar que tal método também se aplica na elaboração da curva de retenção com grande precisão.

4.2.2 Modelo de Arya & Paris para Determinação da Curva de Retenção de Água no Solo.

A determinação da curva de retenção de água no solo vem se tornando cada vez mais comum através do uso de métodos indiretos. Tal fato se deve às dificuldades experimentais decorrentes de determinações através de métodos diretos. (Modificado de ARYA et al, 1999). Muitos parâmetros físicos influenciam a determinação da curva de retenção (ver capítulo 4.2.1), e, sendo assim, o emprego de métodos diretos requer equações de ajustes de erro, decorrentes das variações dos parâmetros físicos do meio. O modelo matemático de Arya & Paris calcula os valores de umidade e sucção que seriam obtidos pela análise de retenção de água no solo a partir de valores de concentrações e diâmetros das partículas do solo que são determinadas nas análises granulométricas. Isto se mostra possível graças às semelhanças entre a curva de retenção de água no solo e as formas de distribuição das partículas do solo por tamanho.

Assim sendo, a comparação entre os resultados obtidos através dos dois métodos permite a predição da taxa de erro envolvido nos métodos, uma vez que o presente estudo se faz em solos tropicais lateríticos, que contem características que não se adequam ao modelo tradicional de determinação da curva de retenção, como a bimodalidade no tamanho dos poros.

O modelo desenvolvido por Arya & Paris (1981) baseia-se em dois conceitos da relação solo-água, sendo o primeiro a equação da capilaridade, que relaciona a sucção (Ψ_i), expresso pela altura da ascensão capilar, com o diâmetro do poro:

$$\Psi_i = 2\sigma \cdot \cos \theta / \rho_w g r_i \quad (06)$$

Onde,

σ = tensão superficial da água na interface água-ar (0,0728 N/m);

θ = ângulo de contato;

ρ_w = densidade da água (kg/m³);

g = aceleração da gravidade (9,81 m/s²);

r_i = raio do poro (m).

O segundo conceito envolvido no modelo é a distribuição dos tamanhos das partículas do solo e a contribuição de cada fração para a saturação de água no solo:

$$\Theta = (1 - \rho_s/\rho_p) \sum_{i=1}^n w_i \quad (07)$$

Onde,

i = diversas frações das partículas do solo;

ρ_s = densidade do solo (kg/m³);

ρ_p = densidade das partículas do solo (kg/m³);

w_i = fração de massa do solo dada pela curva de distribuição do tamanho das partículas.

A curva de retenção de água no solo é estimada, pelo modelo de Arya & Paris, através da associação entre o raio do poro (r_i) com o raio da partícula (R_i), dada pela equação:

$$r_i = R_i \frac{\sqrt{4 e n_i^{(1-\alpha)}}}{6} \quad (08)$$

Onde,

n_i = número de partículas esféricas da i -ésima classe de massa do solo;

e = relação de vazios obtidas por:

$$n_i = 3 w_i / 4\pi R_i^3 \rho_p$$

$$e_i = \rho_p - \rho_s / \rho_s$$

O valor de α representa o fator de escalonamento, considerado o ajuste empírico para a tortuosidade dos poros em solos nas condições naturais (BASILE & D'URSO, 1997). Para Arya & Paris (1981), o valor de 1,38 para α foi empiricamente considerado a melhor estimativa para o coeficiente.

Logo, a sucção do solo é calculada pela fórmula:

$$\Psi = \frac{2 \sigma}{\rho_w g R_i \sqrt{\frac{2(\rho_p - \rho_s)}{3\rho_s} \frac{3w_i}{4 \pi R_i \rho_p}}} \quad (09)$$

Assim sendo, o modelo descrito será utilizado para se mostrar seu grau de ajuste em relação ao método direto de determinação da curva de retenção.

4.2.3 Condutividade Hidráulica no Solo

O estudo do movimento da água no solo se constitui de suma importância para o melhor entendimento do transporte de contaminantes e, no caso do presente estudo, sua posterior volatilização e entrada de gases em ambientes fechados, perfazendo assim o processo da intrusão de vapores.

A movimentação da água no solo pode ser descrita através do equilíbrio entre as forças da gravidade, capilaridade do solo e as forças coloidais, devido ao atrito com as superfícies sólidas, dentro do próprio fluido e forças inerciais. (JARVIS, 2007). Tal movimento ocorre em condições saturadas e não-saturadas, em que o meio não-saturado promove um movimento mais lento da água no solo, devido à presença de ar e descontinuidades.

A chamada Lei de Darcy é considerada a equação que melhor estabelece o movimento da água em um meio poroso saturado. Desenvolvida por Darcy em 1856, a equação é válida sob condições isotérmicas, para fluidos incompressíveis, com regime de fluxo laminar e para situações em que as interações solo-água não resultem em variações na fluidez e na condutividade hidráulica:

$$Q = - K_o dH / ds \quad (10)$$

Onde,

Q = densidade de fluxo [L/T];

K_o = condutividade hidráulica do meio saturado [L/T];

dH / ds = gradiente de potencial hidráulico [L/L];

H = potencial hidráulico [L].

Em solos não-saturados, o ar presente no solo funciona como uma espécie de barreira, trazendo resistência à passagem da água, acarretando na redução da condutividade hidráulica. Buckingham (1907) foi o primeiro a postular que a lei de Darcy também é válida para solos parcialmente saturados em água e que, neste caso, a condutividade hidráulica é função do teor de água no solo. Experiências realizadas por Richards (1931) e Childs & Collis-George (1950) confirmaram que a Lei de Darcy pode ser aplicada a solos não-saturados de forma satisfatória, com a seguinte equação:

$$Q = -K(\theta) \partial\Phi / \partial z \quad (11)$$

Onde,

$K(\theta)$ = condutividade hidráulica não saturada [L/T];

θ = teor de umidade volumétrica [L^3/L^3];

z = coordenada de posição [L];

Φ = potencial total do solo não saturado [L] composto pelos potenciais gravitacionais [L]

e de sucção [L].

Adicionalmente, a condutividade hidráulica não saturada pode ser obtida indiretamente a partir da curva de retenção e da condutividade hidráulica saturada, através da fórmula de Durner (1994):

$$K(S_e) = K_s \left(\sum_{i=1}^k w_i S_{e_i} \right)^{0,5} \frac{\left(\sum_{i=1}^k w_i \alpha_i \left[1 - \left(1 - S_{e_i}^{\frac{1}{m}} \right)^m \right]^2}{\left(\sum_{i=1}^k w_i \alpha_i \right)^2} \right)^2 \quad (12)$$

Em que,

$K(S_e)$ = função condutividade hidráulica;

K_s = condutividade hidráulica do solo saturado.

Durner (1994), ao incorporar uma equação que permite o cálculo indireto da condutividade hidráulica em solos não saturados, permite que as análises da curva de retenção de água possam ser ajustadas para solos com distribuição de poros bimodais, típicos de solos tropicais. Tal ajuste se faz de suma importância para a determinação indireta da curva de retenção em tais solos, uma vez que o modelo tradicional não pode ser utilizado em solos tropicais, como mostrado nos capítulos 1.0 e 3.0 do presente estudo.

4.2.4 Método de Evaporação HYPROP.

O método de evaporação HYPROP permite a determinação direta, em laboratório, da curva de retenção de água no solo. Uma das maiores vantagens em se usar o método é o fato de que, uma vez instalado, as medidas necessárias para determinação da curva de retenção de água no solo são tiradas automaticamente, sendo necessário a intervenção apenas no fim do ensaio ou na presença de erros.

O método consiste no registro de medidas de pressão capilar em duas alturas diferentes da coluna de solo, tomadas dentro de um determinado intervalo de tempo, através de duas estruturas chamadas tensiômetros; enquanto o peso total da amostra também é registrado em uma balança de precisão, o que denota a variação do peso da água, através da evaporação, no decorrer do ensaio.

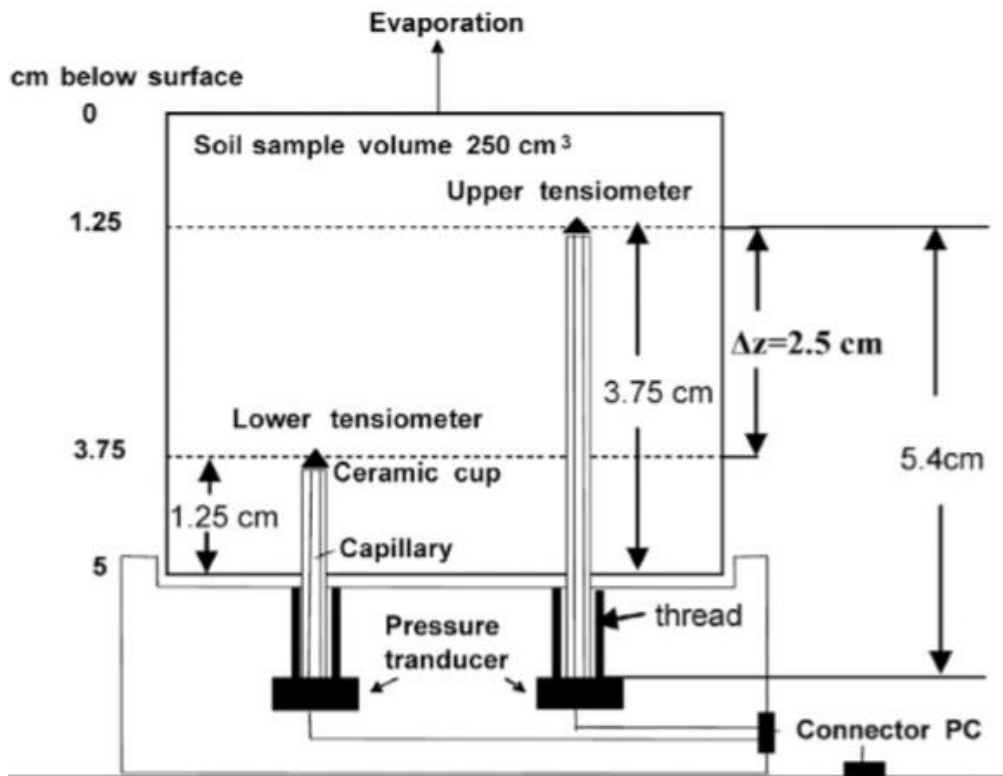


Figura 12: perfil esquemático do equipamento utilizado. (SCHINDLER et al, 2010).

Os valores medidos de pressão nos dois diferentes tensiômetros e quantidade de água no solo são usados para se derivar a curva de retenção de água no solo e as propriedades hidráulicas do solo não-saturado. (PETERS & DURNER, 2008). O procedimento analítico se torna possível quando se assume que as variações na quantidade de água no solo e da pressão são distribuídas de forma linear na coluna de solo.

Para o cálculo da função condutividade hidráulica do solo, assume-se que entre dois intervalos de tempo distintos, o fluxo de água através de uma seção situada exatamente entre os dois tensiômetros é:

$$Q^i = \frac{1}{2} (\Delta V^i / \Delta t^i A) \quad (13)$$

Onde,

Q = Valor da função condutividade hidráulica.

ΔV^i = Perda de água por evaporação (em cm^3)

Δt^i = Intervalo de tempo entre duas medições

A = Área de seção da coluna (em cm^2).

Enquanto isso, a curva de retenção de água no solo pode ser obtida utilizando-se 7 modelos diferentes disponíveis. Para o presente trabalho, serão utilizados dois modelos distintos, para se comparar sua precisão no ajuste da curva de retenção; o modelo unimodal de Van Genuchten (1980) e o modelo bimodal posteriormente desenvolvido por Durner (1994), através de uma modificação do modelo de Arya & Paris.

O método de evaporação HYPROP tem seus princípios formulados por Wind (1968). Uma simplificação do método foi proposta por Schindler (1980). Algumas extensões do método e ajustes foram publicadas por Schindler (2010). A validade do método de evaporação simplificado foi investigada e confirmada por Peters & Durner (2008).

Todos os ajustes necessários para as curvas de retenção obtidas, tanto em caráter unimodal ou bimodal de distribuição de poros serão feitos através do *software* online SWRC-Fit.

4.2.5 Estimativa da Concentração de Vapores em Ambientes Fechados.

De acordo com USEPA (2004), o modelo desenvolvido por Johnson & Ettinger (1991) permite o cálculo da intrusão de vapores em ambientes fechados de forma satisfatória tanto para o regime permanente (*steady-state*) quanto para o regime transiente (*quasy-steady-state*) de transporte de vapores em subsuperfície. A principal diferença entre os dois reside no fato de que o regime transiente assume mudanças no fluxo hídrico do solo com o passar do tempo, o que afeta diretamente o transporte de contaminantes, enquanto o regime permanente assume

que o fluxo é constante. Para o presente estudo, assume-se que o fluxo é permanente. Ainda assim, existe um fator de atenuação envolvido (equação 15) que faz com que a contaminação por vapores seja menor, graças aos processos de biodegradação do contaminante, mudanças de temperatura do ambiente, etc.

Em relação ao fenômeno de intrusão de vapores, Johnson & Ettinger (1991) fizeram uma compilação de teorias e propuseram um modelo matemático para o cálculo da concentração de vapores em ambientes fechados. As principais entradas do modelo envolvem propriedades químicas do contaminante, como a entalpia, temperatura crítica, ponto de ebulição e etc., características estruturais do edifício que supostamente é intrudido por vapores e características do solo em que a contaminação se encontra. As características do solo para entrada no modelo de Johnson & Ettinger envolvem os parâmetros de ajuste para a determinação da curva de retenção de água no solo (ver item 4.2.1).

Como apresentado no capítulo 3.0 do presente estudo, os cálculos realizados para o modelo de Johnson & Ettinger são baseados em solos com distribuição de poros unimodal, o que não reflete a realidade da maior parte dos solos encontrados no Brasil, que contém características bimodais. Por este motivo, buscou-se acentuar a bimodalidade dos Solos 1, 2 e 4 nas alterações feitas em laboratório do solo natural da Formação Rio Claro.

Alguns autores propuseram correções no modelo tradicional de Johnson & Ettinger (1991) para predição do transporte de vapores em solos com distribuição de poros multimodal, visto que a taxa de erro pode ser superior a 30%. (PUTZMANN et al, 2011; DE BIASE et al, 2012; ALFARO SOTO & CHANG, 2013).

De acordo com Johnson & Ettinger (1991) e USEPA (2004), a estimativa da concentração de vapores contaminantes em ambientes fechados pode ser calculada através da fórmula:

$$\alpha = C_{building} / C_{source} \quad (14)$$

Onde,

α = coeficiente de atenuação a regime permanente;

$C_{building}$ = concentração do contaminante gasoso em ambiente fechado. [$\mu\text{g}/\text{m}^3$].

C_{source} = concentração de vapor na fonte da contaminação. [$\mu\text{g}/\text{m}^3$].

O fator de atenuação α é calculado da seguinte maneira:

$$\alpha = \frac{\left[\left(\frac{D_T^{eff} A_B}{Q_{building} L_T} \right) \times \exp\left(\frac{Q_{soil} L_{crack}}{D^{crack} A_{crack}} \right) \right]}{\left[\exp\left(\frac{Q_{soil} L_{crack}}{D^{crack} A_{crack}} \right) + \left(\frac{D_T^{eff} A_B}{Q_{building} L_T} \right) + \left(\frac{D_T^{eff} A_B}{Q_{soil} L_T} \right) \left[\exp\left(\frac{Q_{soil} L_{crack}}{D^{crack} A_{crack}} \right) - 1 \right] \right]} \quad (15)$$

Onde,

α = Coeficiente de atenuação [-];

D_T^{eff} = Coeficiente de difusão efetiva total [m^2/s];

A_B = Área da construção ($L_B \times W_B$) [m^2];

$Q_{building}$ = Vazão de ventilação [m^3/s];

L_T = Espessura total (entre face inferior da fundação e nível da água subterrânea) [m];

Q_{soil} = Vazão de gás do solo em ambiente fechado através de trincas e fissuras [m^3/s];

L_{crack} = Espessura da fissura no piso ou parede [m];

D^{crack} = Coeficiente de difusão efetiva através das fissuras [m^2/s];

A_{crack} = Área total de fissuras [m^2].

De acordo com USEPA (2004), o coeficiente de difusão efetiva total (D_i^{eff}) da camada de solo em contato com o piso da edificação é equivalente ao coeficiente de difusão efetiva através das fissuras (D_i^{crack}). O coeficiente de difusão efetiva na zona não-saturada pode ser expresso por:

$$D_i^{eff} = D_a (\theta_{a,i}^{3.33} / n_i^2) + (D_w / H'_{TS}) (\theta_{w,i}^{3.33} / n_i^2) \quad (16);$$

$$\theta_{w,i} = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha h)^N]^M} \quad (17)$$

Onde,

D_i^{eff} = Coeficiente de difusão na camada de solo não saturado [m^2/s];

D_a = Difusividade no ar [m^2/s];

$\theta_{a,i}$ = Teor volumétrico de ar na camada de solo não saturado [-];

$\theta_{w,i}$ = Teor volumétrico de água na camada de solo não saturado [-];

n_i = Umidade volumétrica de saturação [-];

D_w = Difusividade na água [m^2/s];

H'_{TS} = Constante de Henri para a temperatura do sistema [-];

θ_r = Teor de água residual [-];

θ_s = Teor de água saturada no solo [-];

α = Parâmetro "α" de ajuste de Van Genuchten [m^{-1}];

H = Pressão [m];

N = Parâmetro "N" de ajuste de Van Genuchten [-];

M = Parâmetro "M" de ajuste de Van Genuchten [-].

A vazão de ventilação no edifício é obtida através da fórmula:

$$Q_{building} = (L_B W_B H_B ER) / 3600s / h \quad (18)$$

Onde,

$Q_{building}$ = vazão de ventilação do edifício [m³/s];

L_b = comprimento do ambiente fechado [m];

W_b = largura do ambiente fechado [m];

H_b = altura do ambiente fechado [m];

ER = Renovação do ar no ambiente fechado [h⁻¹].

A vazão de gas do solo em ambiente fechado proveniente de trincas e fissuras é calculada da seguinte forma:

$$Q_{soil} = \frac{2\pi\Delta P k_v X_{crack}}{\mu \ln(2 Z_{crack} / r_{crack})} \quad (19)$$

Onde,

Q_{soil} = Vazão de gás do solo em ambiente fechado através de trincas e fissuras [m³/s];

ΔP = Diferença de pressão entre superfície do solo e espaço fechado [Pa];

K_v = Permeabilidade do vapor no solo (solo em contato com fundação) [m²];

X_{crack} = Perímetro da junta entre solo e piso [m];

μ = Viscosidade do ar [kg.m⁻¹.s⁻¹(1,82e-5)];

Z_{crack} = Profundidade da fissura abaixo do piso [m];

R_{crack} = raio equivalente da fissura [m].

O fator permeabilidade de vapor no solo (K_v) é calculado através das seguintes fórmulas:

$$K_v = K_i \cdot K_{rg} \quad (20)$$

Sendo que:

$$(21); \quad k_i = \frac{K_s \mu_w}{\rho_w g}$$

$$K_{rg} = (1-S_{te})^{1/2} (1-S_{te}^{1/M})^{2M} \quad (22)$$

Onde:

K_i = Permeabilidade intrínseca do solo [cm²];

K_{rg} = Permeabilidade relativa do ar [-];

K_s = Condutividade hidráulica saturada [cm/s];

$M\mu_w$ = Viscosidade dinâmica da água [g/cm.s];

ρ_w = Densidade da água [g/cm³];

Gg = Aceleração da gravidade [cm/s²];

S_{te} = Coeficiente de difusão através da zona capilar [-];

M = Parâmetro M de Van Genuchten (1980) [-].

Como mencionado acima, as propostas de Johnson & Ettinger(1991) e USEPA (2004) baseiam-se parcialmente nos parâmetros do solo, incluindo a concentração de contaminantes de vapor nos espaços internos. Isso pode ser visto nas equações 16 e 18, onde D^{eff} e Q_{soil} dependem indiretamente da curva de pressão capilar do solo. Entretanto, alguns meios porosos possuem sistemas de poros que não podem ser representados por curvas sigmoidais de pressão capilar, pois possuem sistemas bimodais ou multimodais de distribuição de poros no solo. Para este trabalho, foi utilizada uma equação semelhante à de Van Genuchten (equação 17), Devido a essas limitações, Alfaro Soto & Chang (2016) desenvolveram um modelo similar ao de Johnson & Ettinger (1991), incluindo o modelo bimodal de Durner (1994) e realizando uma adaptação da permeabilidade para gases, permitindo assim, o cálculo de concentrações dos compostos em ambiente fechado para solos lateríticos com distribuição de poros diferenciada.

$$S_{te} = \sum_{i=1}^k w_i \left(1 + (\alpha_i h)^{n_i}\right)^{-m_i} \quad (23)$$

Onde,

K = número de subsistemas de distribuição de poros [-];

W = fator de ajuste “w” do modelo [-];

h = Pressão de entrada de ar [cm];

α , N e M são os parâmetros de ajuste da curva, similar ao modelo unimodal de Van Genuchten. Durner (1994), portanto, pôde ajustar o modelo unimodal de Van Genuchten para a modelagem de transporte de vapores em solos com distribuição de poros multimodal, através da equação 23 descrita.

Os cálculos descritos acima foram sintetizados numa tabela através do *software* Microsoft Office Excel por Alfaro Soto & Chang (2016), onde é possível, com a inserção dos gases que se deseja estudar, das características estruturais do edifício e das características do solo, o cálculo automático da concentração final de vapores em ambiente fechado.

Os gases escolhidos para a determinação da concentração final são os gases do grupo BTEX (Benzeno, Tolueno e m-Xileno). Tais gases são considerados altamente tóxicos e conhecidamente responsáveis por afetar o sistema nervoso, a medula óssea além de provocar dores de cabeça, náuseas, anemia e leucemia. Além disso, tais compostos estão presentes em grande parte dos derivados de petróleo, especialmente os combustíveis e tem alta volatilidade. (Modificado de MARIANO, 2005).

Assim sendo, as predições da concentração final de gases serão feitas com os ajustes referidos para o modelo unimodal de Van Genuchten (1980) e bimodal de Durner (1994) em 4 umidades de solo diferentes, o que reflete valores de sucção diferentes. Os valores de umidade volumétrica foram estrategicamente escolhidos em pontos nos quais há maior diferença de sucção dentro das curvas de retenção obtidas, como mostra o gráfico 1:

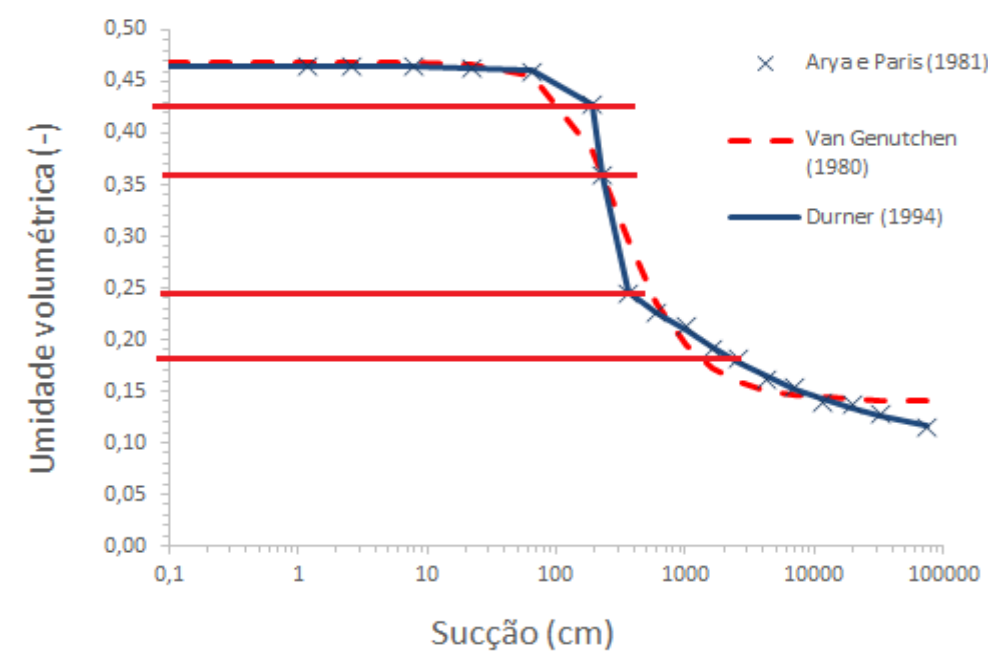


Gráfico 1: Curva de retenção obtida para o Solo 1. As linhas vermelhas contínuas indicam os valores de umidade escolhidos para o cálculo da concentração final de vapores. Ressalta-se que a maior diferença de sucção entre os ajustes unimodais e bimodais se dá no ponto de umidade 0,245; no qual a diferença de sucção é de 143 cm.

Além disso, os parâmetros serão calculados em duas fontes, localizadas 1,5m e 0,75m abaixo da superfície térrea do edifício, a fim de se comparar a diferença de concentração de gases de acordo com a mudança, também, de profundidade da fonte de volatilização.

Quanto às características dos Solos que serão utilizadas, o capítulo 5.1.3 mostrou que as curvas de retenção produzidas para os Solos 1, 2 e 4, a segunda modificação não resultou em diferença significativa que justifique a bimodalidade no tamanho dos poros típica de solos tropicais, o que faz com que a predição da intrusão de vapores em ambientes fechados seja feita utilizando-se apenas os Solos 1 e 4. Assim sendo, portanto, os resultados obtidos para a variação de concentração de vapores serão mostrados em dois capítulos distintos, com a mudança na profundidade da fonte e na umidade dos Solos 1 e 4 para os modelos unimodais e bimodais. Os dados de entrada químicos dos contaminantes e os dados de entrada dos Solos são expressos nos anexos I e II dos capítulos 8.0 e 9.0, respectivamente.

4.3 Modelo Conceitual da Área de Estudo.

Como mostrado no capítulo 4.2.5, os parâmetros de entrada do modelo de Johnson & Ettinger envolvem 3 grandes grupos, sendo eles as características químicas das substâncias contaminantes; as características do solo contaminado, principal foco do presente estudo e características estruturais do edifício que é intrudido por vapores. Este último conjunto de parâmetros é o foco deste capítulo através da conjectura de um modelo conceitual de ambiente fechado.

O modelo conceitual da área de estudo permite a visualização de uma suposta contaminação por hidrocarbonetos em subsuperfície, que migra através do solo, volatiliza, gerando vapores que ascendem através da zona não vadosa e invade um espaço fechado. Johnson & Ettinger, inclusive, fizeram uma estimativa média do tamanho dos edifícios mais afetados (residências) pela intrusão de vapores e quais substâncias presentes nos hidrocarbonetos são mais propensas a volatilizar.

A fim de simplificar a modelagem, o ambiente de estudo não terá paredes internas que possam influir no fluxo de gases e não terá porão ou algum nível subterrâneo. Além disso, o presente estudo foi realizado com duas profundidades de fonte diferentes, a 0,75 e 1,5 metros. Um esquema simplificado pode ser visto na figura 13.

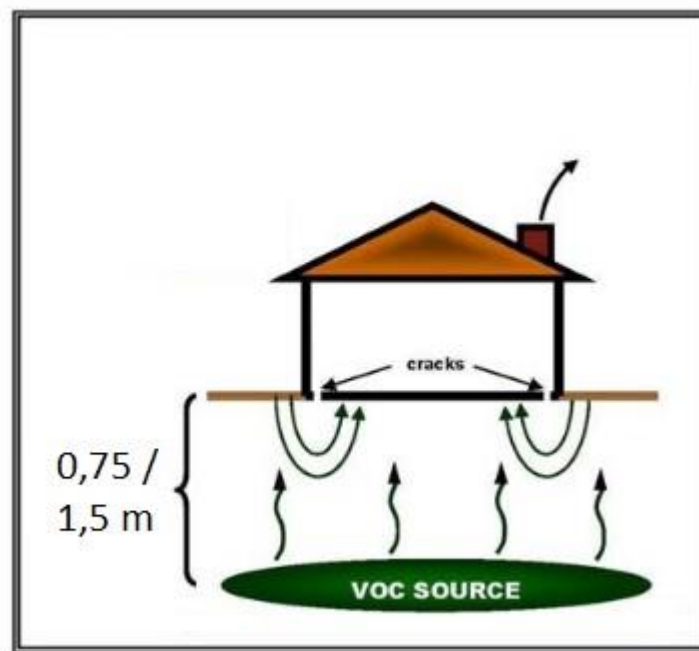


Figura 13: modelo conceitual da área de estudo. Modificado de <http://www.pineng.com/new-blog-3/2016/3/7/vapor-intrusion>. Acesso dia 04/06/2019 as 16:42 horas.

Assume-se que a espessura do piso no nível térreo da casa em contato com o solo seja de 20 centímetros. A casa possui dimensão de 10 metros de largura por 10 metros de profundidade, com 3 metros de altura. A diferença de pressão entre a superfície do solo e o interior da casa é de 5 Pascal e que a taxa de renovação do ar no ambiente fechado é de 0,5/hora. O último parâmetro físico a ser considerado é a área de fissuras em relação à área de piso da casa, que no modelo corresponde a 1%.

A tabela 1 resume os dados expostos acima:

Tabela 1: Síntese dos dados estruturais do modelo conceitual de ambiente fechado.

Simbolo	Parâmetros	Unidade	Valores
L_f	Espessura do concreto ou fundação ou porão	m	0,20
L_b	Comprimento do ambiente fechado	m	10,0
W_b	Largura do ambiente fechado	m	10,0
H_b	Altura do ambiente fechado	m	3,0
ΔP	Diferencial de pressão entre superfície do solo e espaço fechado	Pa	5,0
ER	Renovação de ar no ambiente fechado	h^{-1}	0,50
H	Área da fissura/ Área do piso ou da fundação	%	0,01

5.0 Resultados e Discussão.

A seguir serão apresentados e discutidos os resultados obtidos nas análises feitas em laboratório para as duas modificações do solo da Formação Rio Claro, denominados Solo 1, Solo 2; o solo da Formação Rio Claro original, este retirado da literatura segundo Alfaro Soto et al. (2015), denominado Solo 3; e o último solo produzido, contendo 70% de areia de filtro e 30% de solo da Formação Rio Claro, denominado Solo 4. Todas as comparações feitas visam prever o grau de ajuste e precisão dos modelos descritos para cada modificação de solo.

5.1 Caracterização Física e Hidráulica dos Materiais Utilizados

5.1.1 Índices Físicos.

Os índices físicos obtidos em laboratório foram umidade natural, massa específica seca e massa específica dos sólidos. A média de cada índice analisado encontra-se na tabela abaixo, uma vez que para as duas modificações do solo da Formação Rio Claro foram realizados 3 ensaios para determinação dos índices físicos.

Tabela 2: Índices físicos dos Solos obtidos em laboratório. Os índices físicos referentes ao Solo 3 foram retirados de Alfaro Soto et al (2004).

Índices Físicos			
	W (%)	ρ_d (g/cm ³)	ρ_s (g/cm ³)
Solo 1	19,0	1,41	2,45
Solo 2	17,0	1,44	2,71
Solo 3	8,10	1,44	2,65
Solo 4	7,85	1,44	2,67

5.1.2 Curvas Granulométricas.

A seguir serão exibidos os gráficos e tabelas referentes às análises granulométricas obtidas em laboratório para os Solos 1, 2 e 4. O solo 3 terá curvas granulométricas retiradas de Alfaro Soto et al (2015).

Os Solos 1 e 2 foram texturalmente caracterizados como solos areno-argilosos a partir do ensaio de granulometria conjunta. A bimodalidade das curvas fica evidenciada nos gráficos de granulometria 1 e 2 apresentados a seguir, juntamente com as tabelas dos resultados das respectivas análises granulométricas.

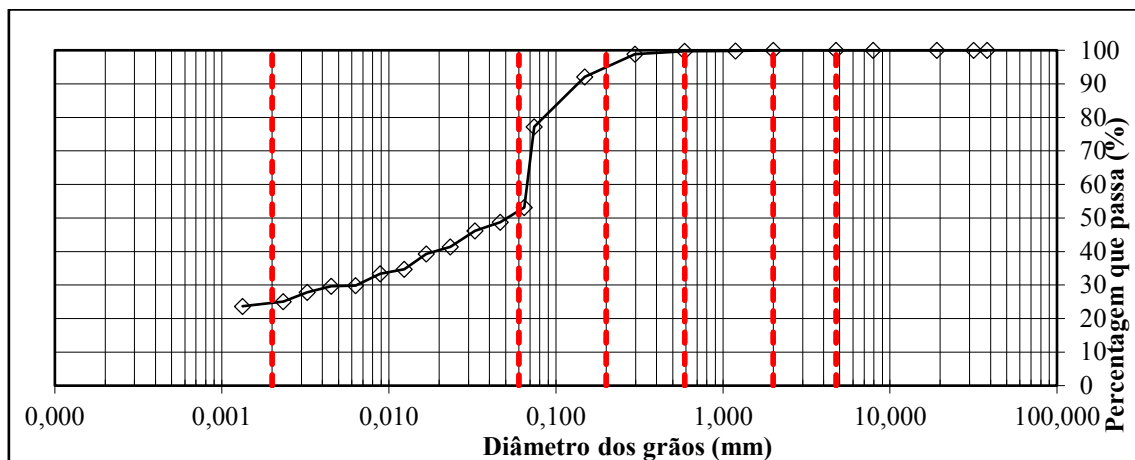


Gráfico 2: Gráfico de granulometria do Solo 1 (Formação Rio Claro modificada).

A tabela 3 se refere à granulométrica do Solo 1.

Tabela 3: distribuição granulométrica do Solo 1 obtida em laboratório.

Diâmetro das partículas (pol)	Diâmetro das partículas (mm)	Porcentagem que passa
1 ½"	38,10000	100,0
1 ¼"	31,70000	100,0
¾"	19,10000	100,0
5/16 "	7,93000	100,0
4	4,76000	100,0
10	2,00000	100,0
16	1,19000	99,8
30	0,59000	99,7
50	0,29700	98,8
100	0,14900	92,1
200	0,07400	77,2
	0,06464	53,1
	0,04635	48,7
	0,03278	46,2
	0,02336	41,4
	0,01676	39,3
	0,01233	34,7
	0,00887	33,3
	0,00632	29,9
	0,00452	29,7
	0,00325	27,8
	0,00233	25,1
	0,00133	23,7
	0,00000	0,0
	0,00000	0,0

A segunda modificação da Formação Rio Claro (Solo 2) encontra-se expressa nas análises granulométricas do gráfico 2 e tabela 4.

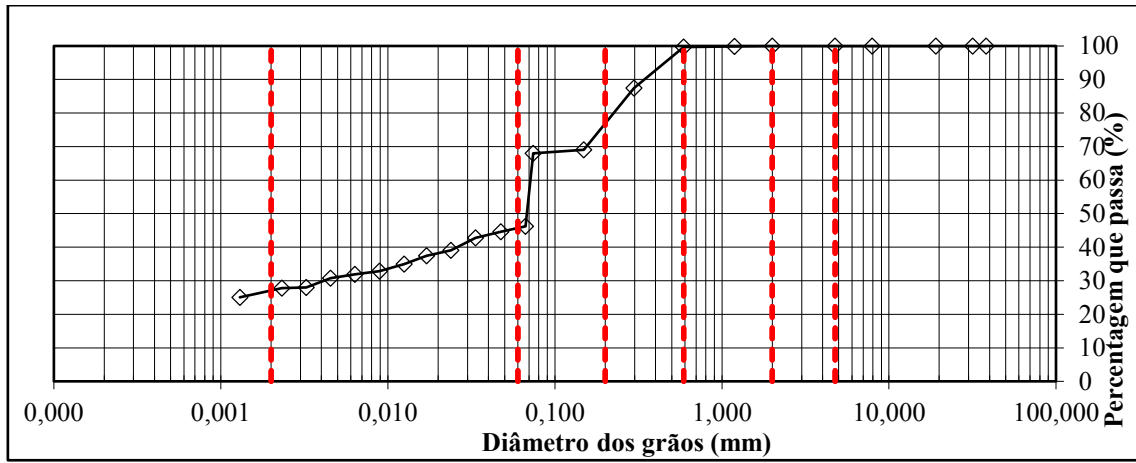


Gráfico 3: Gráfico de granulometria do Solo 2.

Tabela 4: Resultados da análise granulométrica do Solo 2.

Diâmetro das partículas (pol)	Diâmetro das partículas (mm)	Porcentagem que passa
1 ½"	38,10000	100,0
1 ¼"	31,70000	100,0
¾"	19,10000	100,0
5/16 "	7,93000	100,0
4	4,76000	100,0
10	2,00000	100,0
16	1,19000	99,9
30	0,59000	99,7
50	0,29700	87,5
100	0,14900	69,0
200	0,07400	68,0
	0,06675	46,2
	0,04744	44,6
	0,03354	42,8
	0,02385	39,1
	0,01705	37,5
	0,01251	34,9
	0,00892	32,9
	0,00635	31,9
	0,00454	30,8
	0,00324	28,0
	0,00232	27,8
	0,00130	25,1
	0,00000	0,0

Observando-se os gráficos de granulometria 1 e 2 de seus respectivos Solos, nota-se uma descontinuidade maior no tamanho das partículas entre as linhas de 0,60 e 0,80 milímetros. O Solo 2 evidencia essa descontinuidade de forma mais clara. Isso se deve à diferença na modificação das frações do solo produzido em laboratório.

O Solo 3, a Formação Rio Claro sem modificações, apresenta as análises granulométricas retiradas de Alfaro Soto et al (2015), a ver:

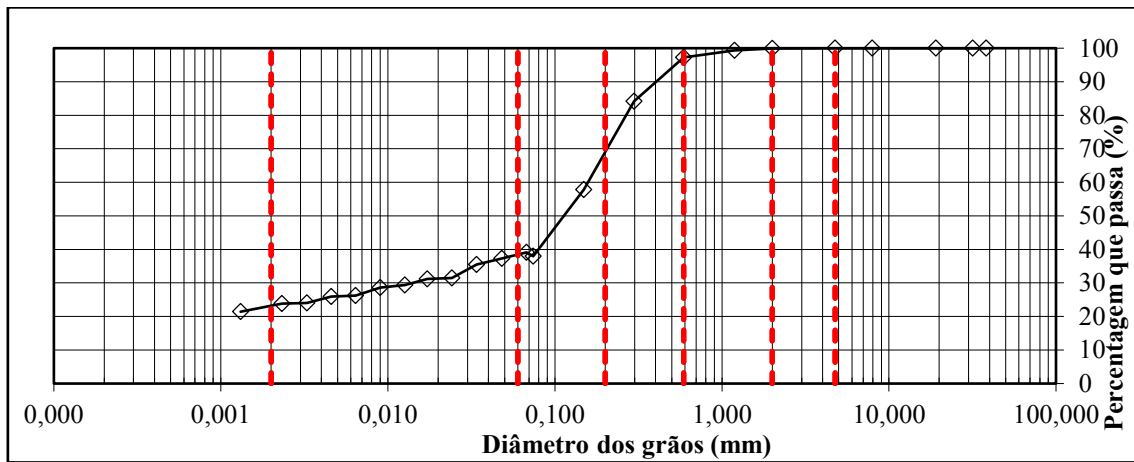


Gráfico 4: Gráfico de granulometria do Solo 3. Retirado de Alfaro soto et al. (2015).

Tabela 5: Resultados da análise granulométrica do Solo 3. Retirado de Alfaro Soto et al. (2015).

Tamanho das partículas (pol)	Tamanho das partículas (mm)	Porcentagem que passa
1 ½"	38,10000	100,0
1 ¼"	31,70000	100,0
¾"	19,10000	100,0
5/16 "	7,93000	100,0
4	4,76000	100,0
10	2,00000	100,0
16	1,19000	99,4
30	0,59000	97,2
50	0,29700	84,2
100	0,14900	57,9
200	0,07400	38,0
	0,06758	39,1
	0,04801	37,3
	0,03395	35,4
	0,02411	31,5
	0,01722	31,2
	0,01262	29,4
	0,00899	28,6
	0,00640	26,2
	0,00458	25,9
	0,00328	24,1
	0,00232	23,8
	0,00131	21,4
	0,00000	0,0
	0,00000	0,0

Fazendo-se uma comparação direta entre os gráficos de granulometria entre a Formação Rio Claro original (Solo 3) e suas duas modificações, nota-se novamente a expressiva diferença nas descontinuidades. Enquanto o Solo 3 apresenta uma descontinuidade mais acentuada entre

a faixa de 0,1 e 0,3 milímetros, as alterações no solo trouxeram descontinuidades em frações menores do solo, entre 0,6 e 0,8 milímetros.

Por fim, o Solo 4, constituído por 70% de areia de filtro (areia grossa) e 30% de solo não modificado da Formação Rio Claro apresenta análises granulométricas muito distintas, a ver:

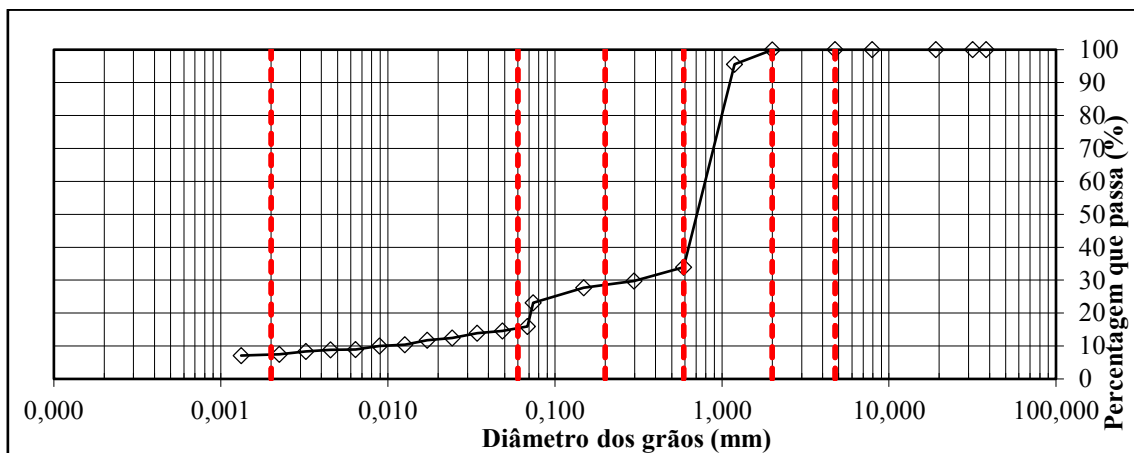


Gráfico 5: Gráfico de granulometria do Solo 4, obtido em laboratório.

Como mostra o gráfico 4, duas descontinuidades têm maior expressividade, uma entre 0,07 e 0,08 mm e outra entre 0,6 e 1 mm, evidenciando maior quantidade de partículas mais grossas. A tabela com os valores da análise granulométrica encontra-se a seguir.

Tabela 6: Análise granulométrica do Solo 4 obtida em laboratório.

Tamanho das partículas (pol)	Tamanho das partículas (mm)	Porcentagem que passa
1 ½"	38,10000	100,0
1 ¼"	31,70000	100,0
¾"	19,10000	100,0
5/16 "	7,93000	100,0
4	4,76000	100
10	2,00000	99,99141224
16	1,19000	95,52988568
30	0,59000	33,89124077
50	0,29700	29,71360798
100	0,14900	27,70407228
200	0,07400	23,14696797
	0,06832	15,93029375
	0,04853	14,62000985
	0,03432	13,86142444
	0,02430	12,41321591
	0,01719	11,79255512
	0,01262	10,4133089
	0,00893	9,99953504
	0,00640	8,965100381
	0,00453	8,89613807
	0,00323	8,344439585
	0,00224	7,516891858
	0,00132	7,103117994
	0,00000	0
	0,00000	0

Segundo Arya & Paris (1981), as descontinuidades granulométricas expressas nos solos guardam relação direta com a curva de retenção de água no solo, motivo este pelo qual o

presente trabalho buscou evidenciar tais discontinuidades ao modificar o solo da Formação Rio Claro.

5.1.3 Curvas de Retenção e Condutividade Hidráulica Não saturada.

As curvas de retenção dos gráficos elaboradas a partir dos quatro Solos serão mostradas a seguir. Tais curvas foram sintetizadas a partir das curvas granulométricas dos gráficos 1 a 4, com o auxílio do modelo de Arya & Paris (1981) (item 4.2.2).

As curvas de retenção também exibem dois diferentes modelos de ajuste por regressão, o modelo unimodal de Van Genuchten (1980) e o modelo bimodal de Durner (1994) (programa online SWRC Fit, equações 7 e 9, item 4.2.2) a partir da curva de retenção obtida de Arya & Paris (1981), além do resultado obtido de forma direta pelo método de evaporação HYPROP, para fins comparativos. Os parâmetros de ajuste por regressão não-linear são resumidos nas tabelas 6, 7 e 8.

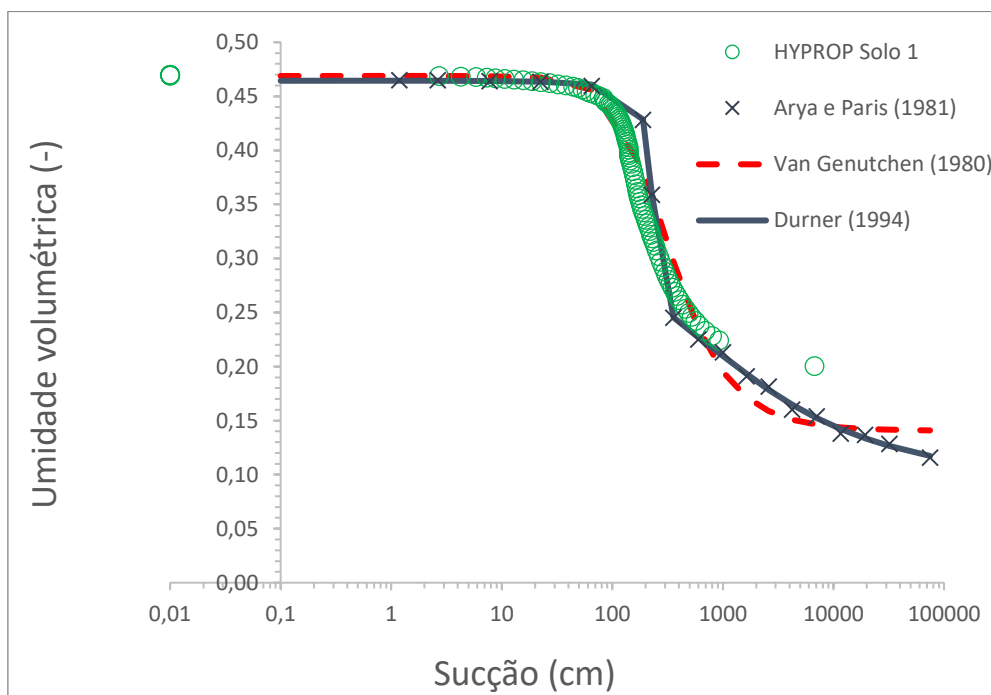


Gráfico 6: Curva de retenção para o Solo 1, através de método direto (método de evaporação HYPROP) e métodos indiretos (Van Genuchten e Durner).

O gráfico 5 mostra que o método de evaporação HYPROP (item 4.2.4) foi capaz de obter resultados próximos aos apresentados nos modelos teóricos, porém acima de 1000 centímetros de sucção, o método HYPROP não foi capaz de registrar medidas precisas.

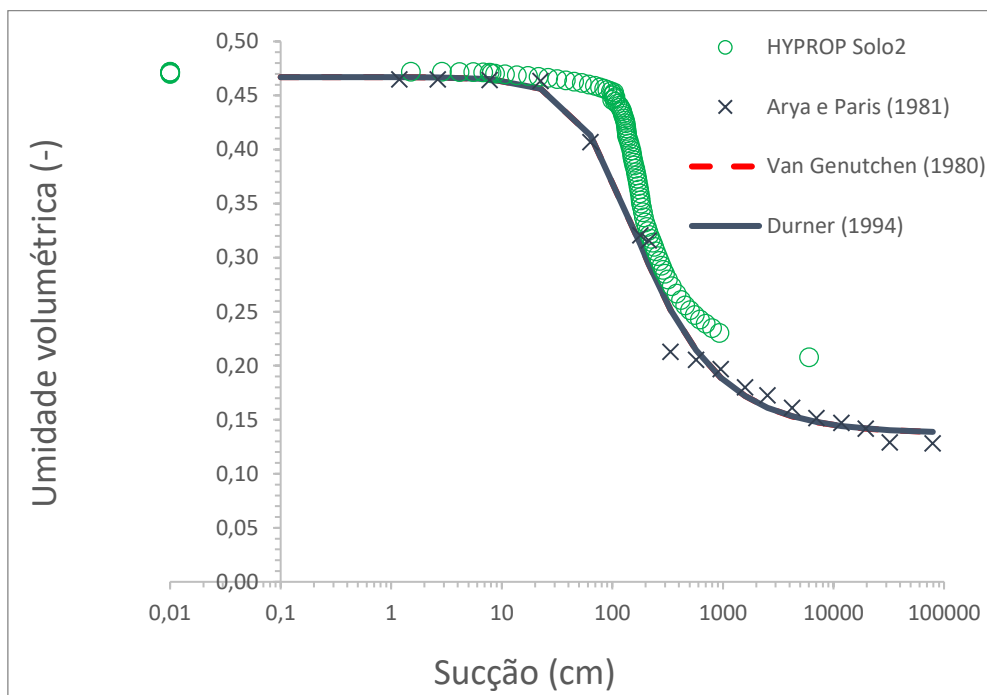


Gráfico 7: Curva de retenção obtida para o Solo 2. A curva do modelo de Van Genuchten (1980) não se encontra visível pois está exatamente sobreposta pela curva do modelo de Durner (1994).

Para o Solo 2, novamente o gráfico 6 evidencia que o método de evaporação HYPROP não foi capaz de registrar medidas precisas para valores de sucção acima de 1000 cm.

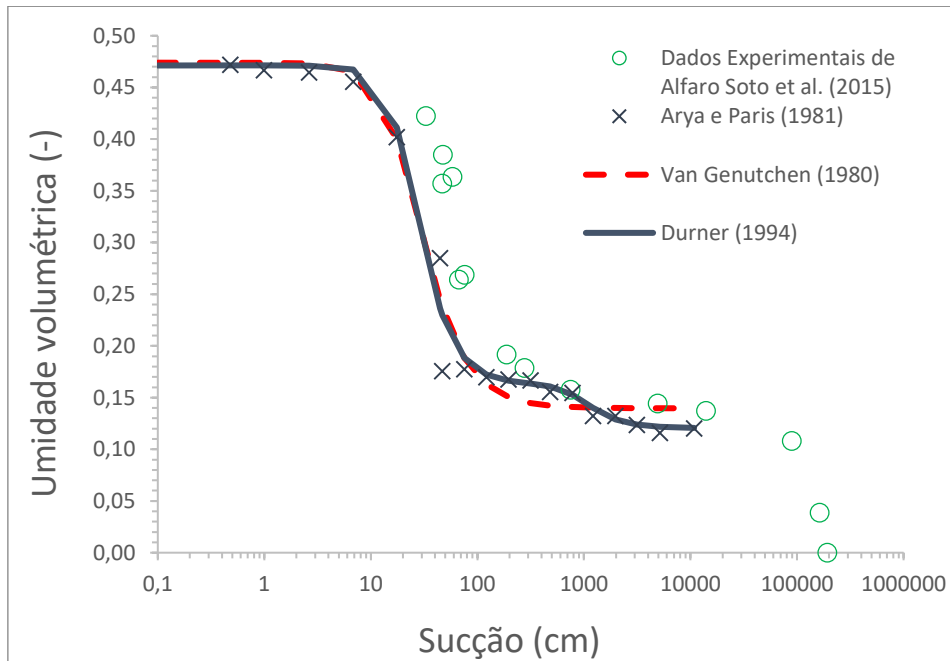


Gráfico 8: Curva de retenção para o Solo 3 (Formação Rio Claro), retirada de Alfaro Soto et al (2015).

O Solo 3 não possui ensaio realizado através do método de evaporação HYPROP. Sua curva de retenção foi retirada da literatura (ALFARO SOTO et al, 2015), na qual utilizou-se um outro método (método do funil de placa porosa e papel filtro) para a determinação da curva de retenção. Nota-se pelo gráfico 8 que a Formação Rio Claro exibe padrão bimodal na sua curva de retenção, fato esse que não se repetiu em nenhuma das três análises dos Solos 1, 2 e 4 através do método HYPROP.

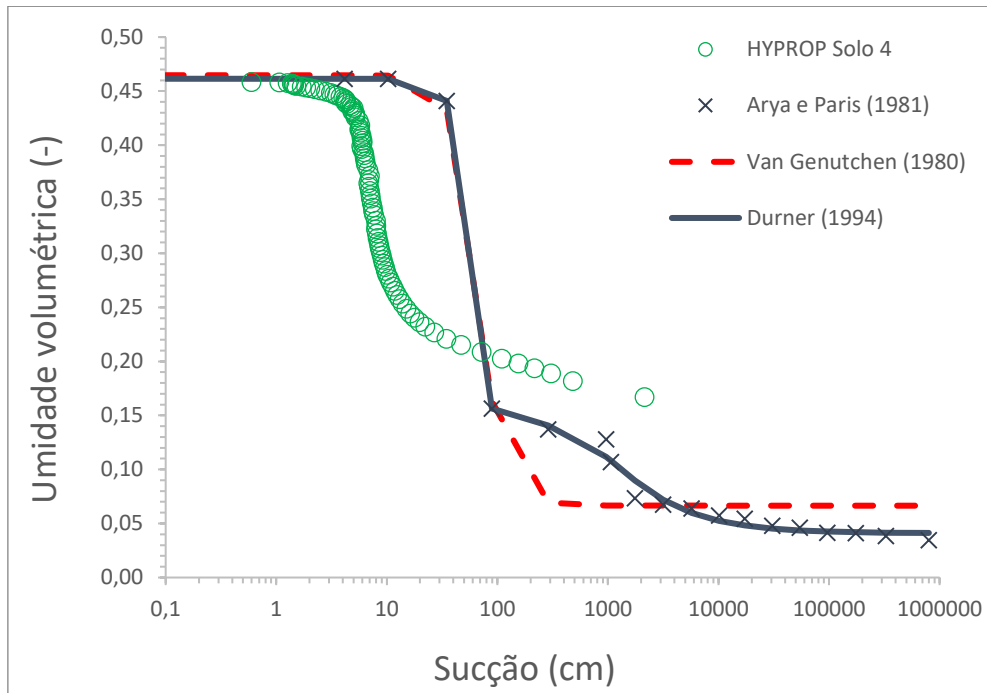


Gráfico 9: Curva de retenção obtida para o Solo 4.

O Solo 4 apresentou a maior discrepância entre a curva obtida a partir dos dados dos modelos teóricos e a curva obtida pelo método HYPROP. Tal discrepância pode ser explicada pela síntese do Solo envolver partículas muito grossas (areia de filtro) e partículas muito finas (argila da Fm. Rio Claro), como evidencia seu gráfico de análise granulométrica (gráfico 5). Novamente os valores altos de sucção (acima de 1000 cm) não mostram medidas precisas pelo método HYPROP, muito embora sua bimodalidade se mostre acentuada pelo modelo de Durner (1994).

A seguir são apresentados os parâmetros de ajuste para determinação da curva de retenção de água a partir do *software* online SWRC Fit.

Tabela 7: Parâmetros de ajuste para a curva de retenção do Solo 1, obtidos pelo software online SWRC Fit.

Ajustes de curva de retenção

Unimodal (van Genuchten, 1981)

Bimodal (Durner, 1994)

θ_s	0,4688	(cm ³ /cm ³)	θ_s	0,46441	(cm ³ /cm ³)
θ_r	0,1405	(cm ³ /cm ³)	θ_r	0,092928	(cm ³ /cm ³)
α	0,0046	(cm ⁻¹)	w ₁	0,52939	(-)
n	2,1573	(-)	α_1	0,0043499	(cm ⁻¹)
R ²	0,97915	(-)	n ₁	10	(-)
			m ₁	0,8989	(-)
			w ₂	0,47061	(-)
			α_2	0,0023829	(cm ⁻¹)
			n ₂	1	(-)
			m ₂	0,2755	(-)
			R ²	0,99974	(-)

Tabela 8: Parâmetros de ajuste para a curva de retenção do Solo 2, obtidos pelo software online SWRC Fit.

Ajustes de curva de retenção

Unimodal (van Genuchten, 1981)

Bimodal (Durner, 1994)

θ_s	0,4670	(cm ³ /cm ³)	θ_s	0,46694	(cm ³ /cm ³)
θ_r	0,1371	(cm ³ /cm ³)	θ_r	0,12891	(cm ³ /cm ³)
α	0,0107	(cm ⁻¹)	w_1	0,97542	(-)
n	1,7942	(-)	α_1	0,010637	(cm ⁻¹)
R^2	0,9906	(-)	n_1	2	(-)
			m_1	0,4432	(-)
			w_2	0,02458	(-)
			α_2	1,69E-13	(cm ⁻¹)
			n_2	6	(-)
			m_2	0,8351	(-)
			R^2	0,9906	(-)

Tabela 9: Parâmetros de ajuste para a curva de retenção do Solo 3, retirado de Alfaro Soto et al. (2015).

Ajustes de curva de retenção

Unimodal (van Genuchten, 1981)

Bimodal (Durner, 1994)

θ_s	0,4740	(cm ³ /cm ³)	θ_s	0,47125	(cm ³ /cm ³)
θ_r	0,1396	(cm ³ /cm ³)	θ_r	0,12047	(cm ³ /cm ³)
α	0,0436	(cm ⁻¹)	w ₁	0,87763	(-)
n	2,5970	(-)	α_1	0,041688	(cm ⁻¹)
R ²	0,975	(-)	n ₁	3,1843	(-)
			m ₁	0,6860	(-)
			w ₂	0,12237	(-)
			α_2	0,0010498	(cm ⁻¹)
			n ₂	3,1302	(-)
			m ₂	0,6805	(-)
			R ²	0,983	(-)

Tabela 10: Parâmetros de ajuste para a curva de retenção do Solo 4, obtidos pelo software online SWRC Fit.

Ajustes de curva de retenção

Unimodal (van Genuchten, 1981)

Bimodal (Durner, 1994)

θ_s	0,4647	(cm ³ /cm ³)	θ_s	0,46147	(cm ³ /cm ³)
θ_r	0,0665	(cm ³ /cm ³)	θ_r	0,041019	(cm ³ /cm ³)
α	0,0170	(cm ⁻¹)	w_1	0,74822	(-)
n	4,1000	(-)	α_1	0,019945	(cm ⁻¹)
R^2	0,96322	(-)	n_1	7	(-)
			m_1	0,8548	(-)
			w_2	0,25178	(-)
			α_2	0,0012245	(cm ⁻¹)
			n_2	2	(-)
			m_2	0,4690	(-)
			R^2	0,99817	(-)

Os gráficos 6 a 9 e as tabelas 6 a 9 evidenciam que o modelo que melhor se ajusta à curva de retenção obtida através do modelo de Arya & Paris (1991) é o modelo bimodal de Durner (1994). Matematicamente, essa relação se expressa através dos valores do coeficiente de determinação (R^2), que se apresenta mais próximo de 1 no modelo bimodal em relação ao modelo unimodal de Van Genuchten (1980), com exceção do Solo 2, no qual o valor de R^2 é o mesmo para os dois modelos.

Os gráficos 10 a 13 mostram a relação de distribuição de poros *versus* sucção para os Solos, o que corrobora com a evidência da bimodalidade dos Solos apresentados, com exceção do Solo 2, que novamente produz curvas iguais. Nota-se que a bimodalidade dos Solos se encontra mais acentuada em baixos valores de sucção.

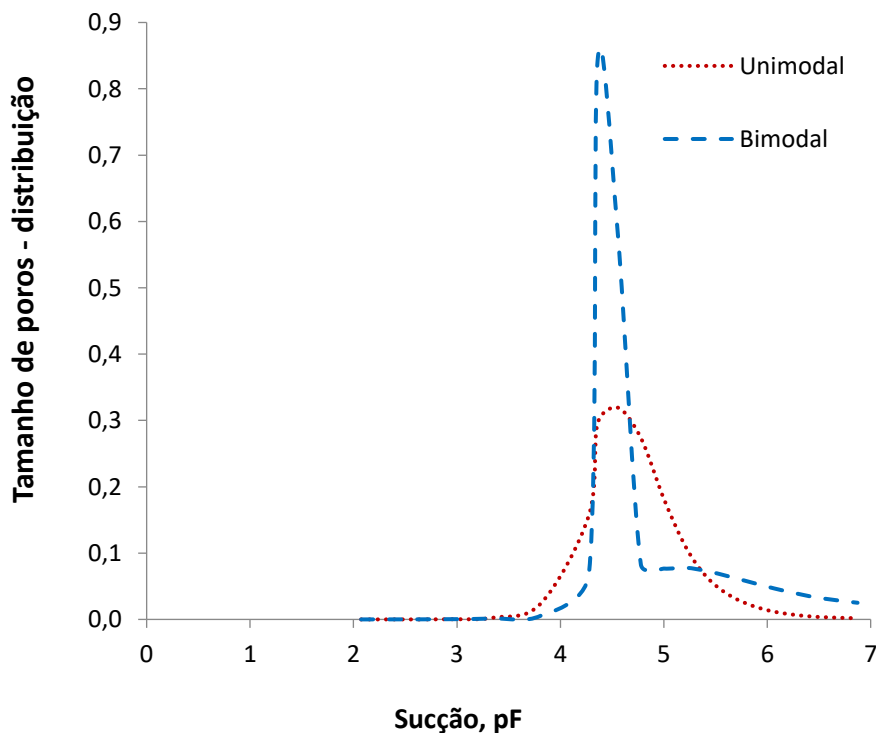


Gráfico 10: gráfico de distribuição de tamanho de poros versus sucção para o Solo 1.

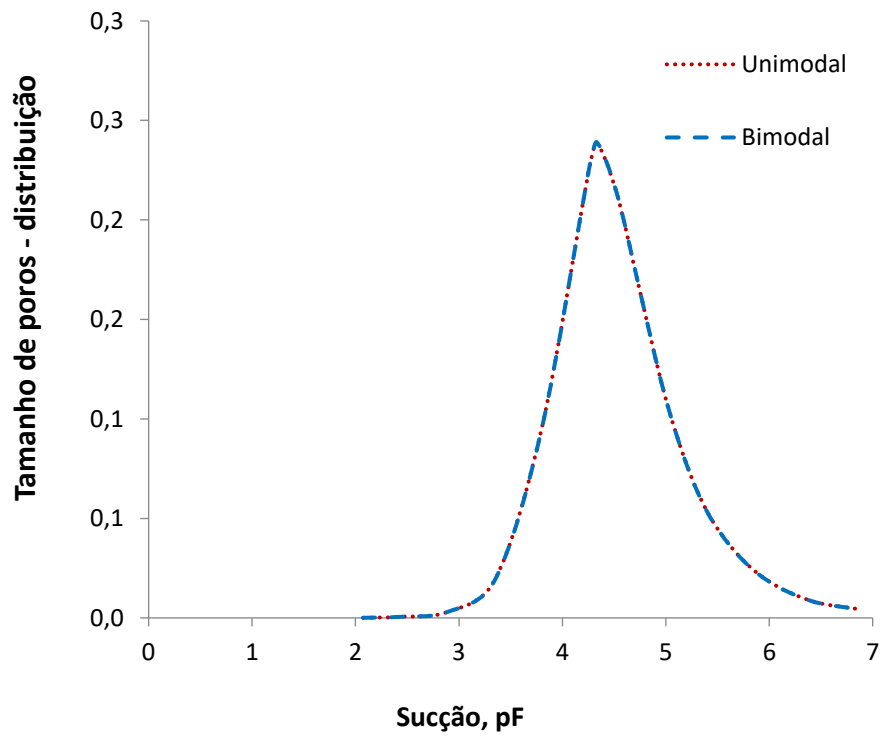


Gráfico 11: gráfico de distribuição de tamanho de poros versus sucção para o Solo 2.

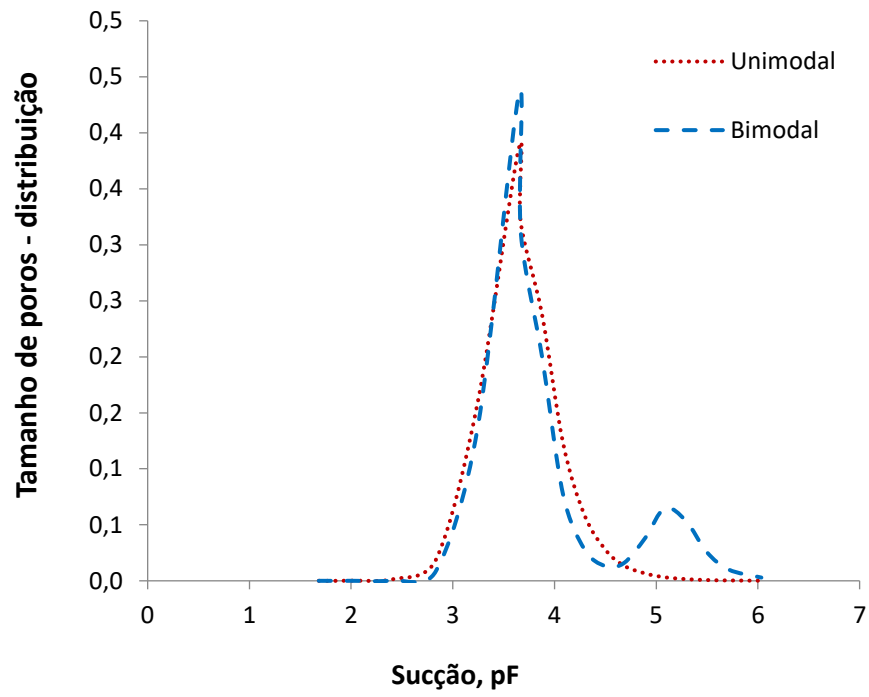


Gráfico 12: gráfico de distribuição de tamanho de poros versus sucção para o Solo 3. Retirado de Alfaro Soto et al. (2015).

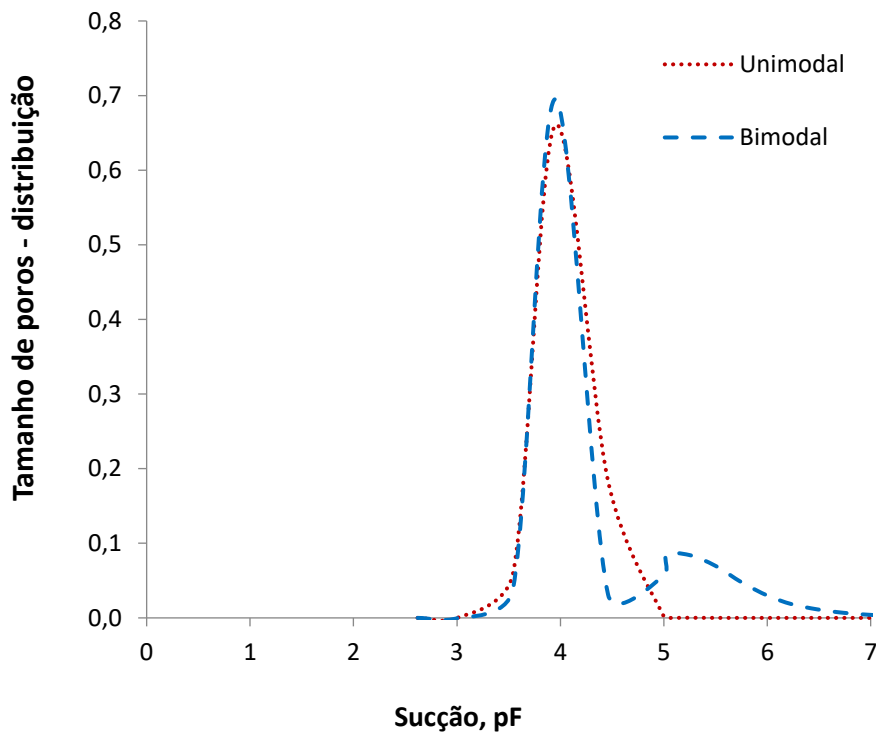


Gráfico 13: gráfico de distribuição de tamanho de poros versus sucção para o Solo 4.

5.2 Estimativa da Concentração de vapores em Ambientes Fechados.

Os parâmetros de ajuste dos modelos de Van Genuchten (1980) e Durner (1994) para determinação da curva de retenção de água, mostrados nas tabelas 6 a 9, são utilizados como valores de entrada para predição da concentração de Compostos Orgânicos Voláteis (VOC's) em ambientes fechados através do modelo de Johnson & Ettinger (1991) e Alfaro Soto & Chang (2016). (Capítulo 4.2.5).

As estimativas da concentração de vapores serão mostradas na forma de gráfico, onde os valores de umidade volumétrica (θ_w) foram fixados, a fim de se fazer uma comparação direta

entre os modelos unimodal e bimodal para cada composto, em cada Solo analisado, de acordo com a profundidade da fonte, a ver:

5.2.1 Estimativa da Concentração de Vapores em Fonte Localizada a 1,5 Metros de Profundidade.

Os gráficos 14 a 21 mostram a estimativa de concentração de vapores em ambiente fechado a partir do cálculo proposto por Johnson & Ettinger (1991) e Alfaro Soto & Chang (2016) para fonte localizada 1,5 metros abaixo do nível térreo do edifício:

- **Benzeno**

Os gráficos 14 e 15 apresentam a variação da concentração final de Benzeno em ambiente fechado para os modelos uni e multimodais, em relação à variação da umidade do solo.

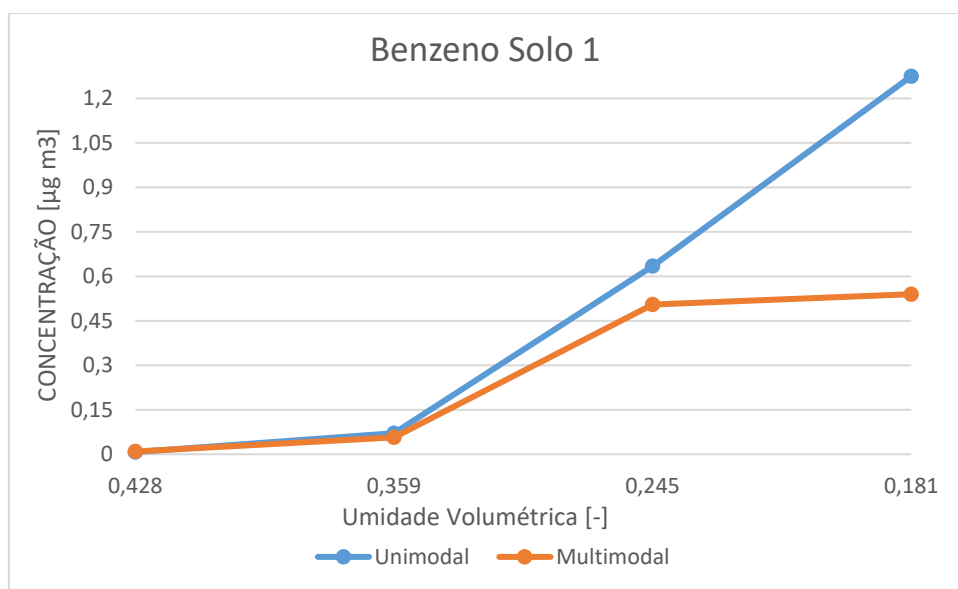


Gráfico 14: variação da concentração final de Benzeno em ambiente fechado para o Solo 1.

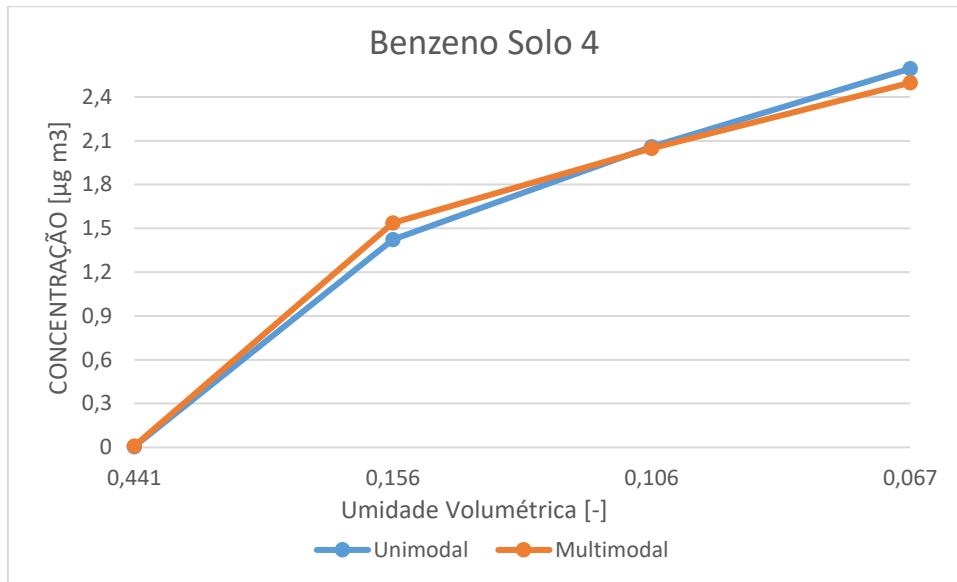


Gráfico 15: variação da concentração final de Benzeno em ambiente fechado para o Solo 4.

- **Tolueno**

Os gráficos 16 e 17 apresentam a variação da concentração final de Tolueno em ambiente fechado para os modelos uni e multimodais, em relação à variação da umidade do solo.

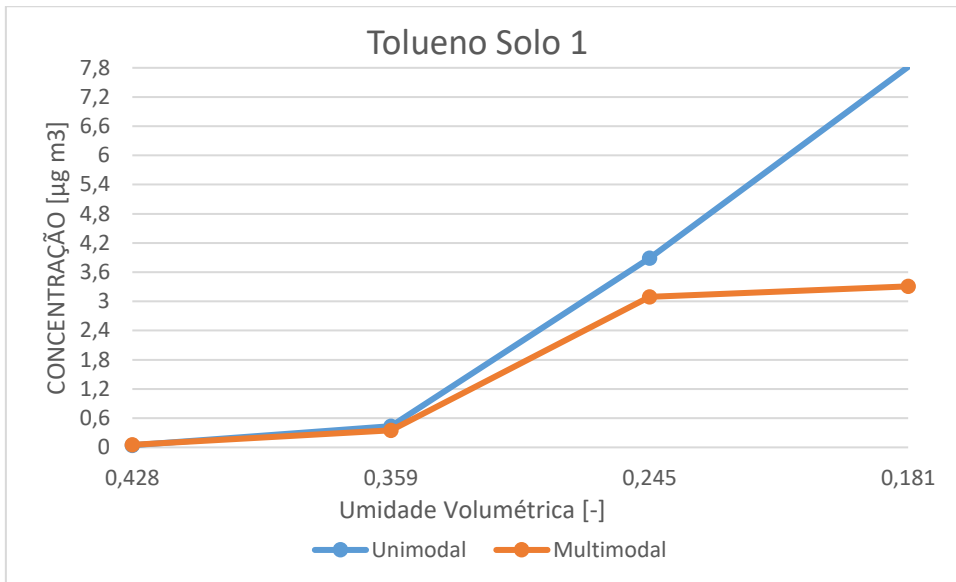


Gráfico 16: variação da concentração final de Tolueno em ambiente fechado para o Solo 1.

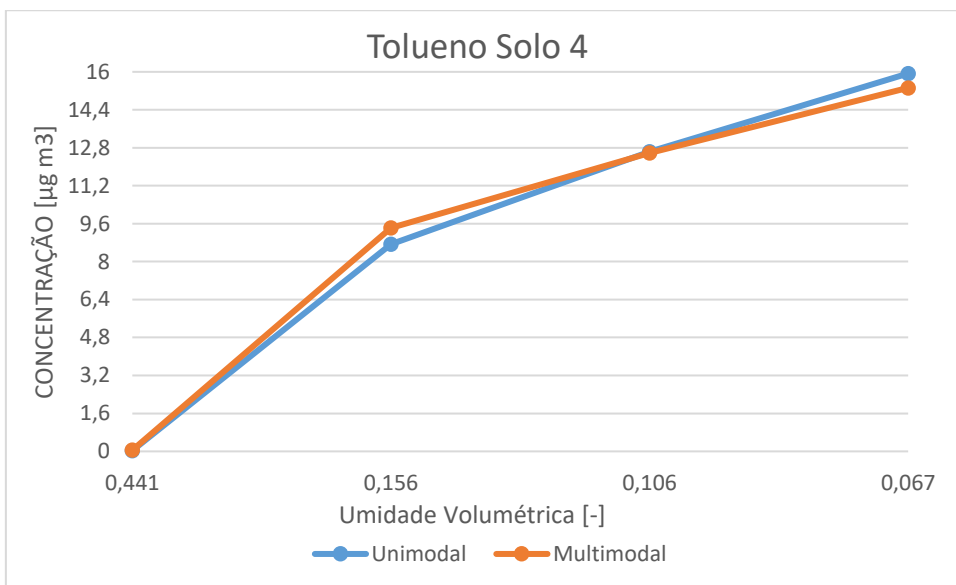


Gráfico 17: variação da concentração final de Tolueno em ambiente fechado para o Solo 4.

- **Xileno**

Os gráficos 18 e 19 apresentam a variação da concentração final de Xileno em ambiente fechado para os modelos uni e multimodais, em relação à variação da umidade do solo.

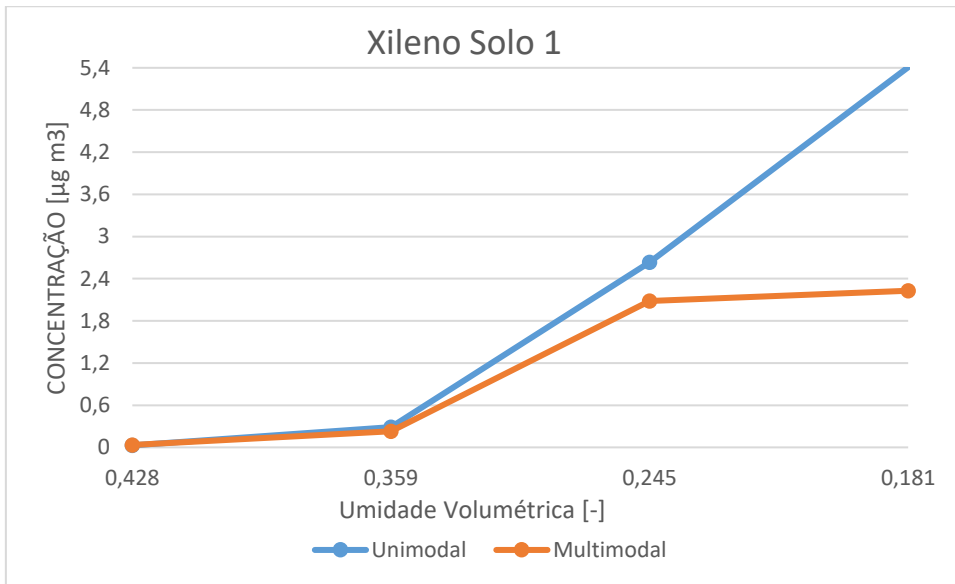


Gráfico 18: variação da concentração final de Xileno em ambiente fechado para o Solo 1.

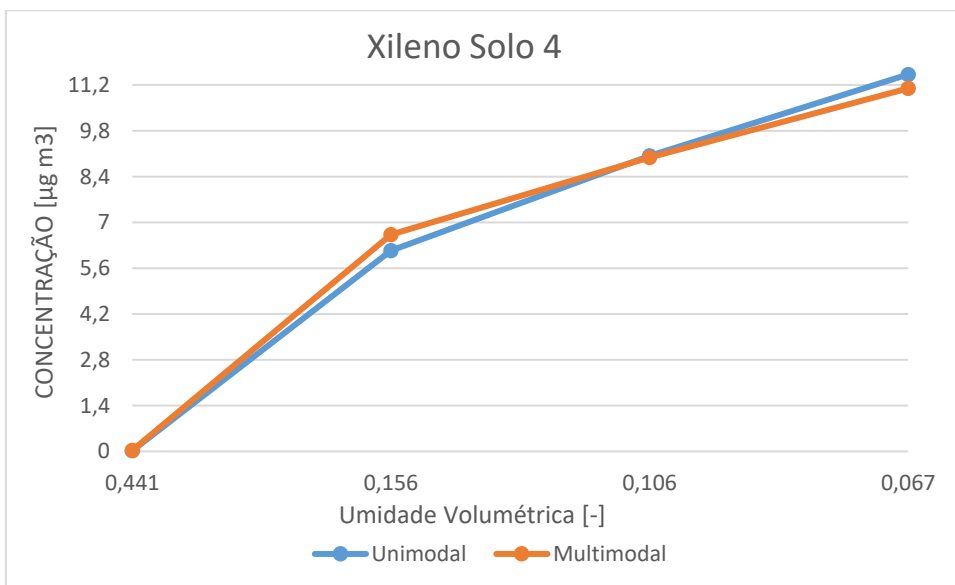


Gráfico 19: variação da concentração final de Xileno em ambiente fechado para o Solo 4.

Muito embora as variações de concentração para os Solos 1 e 4 pareçam iguais, há uma mudança significativa na escala. Os gráficos 20 e 21 permitem a visualização da mudança de concentração dos 3 gases para os Solos estudados no modelo unimodal, a ver:

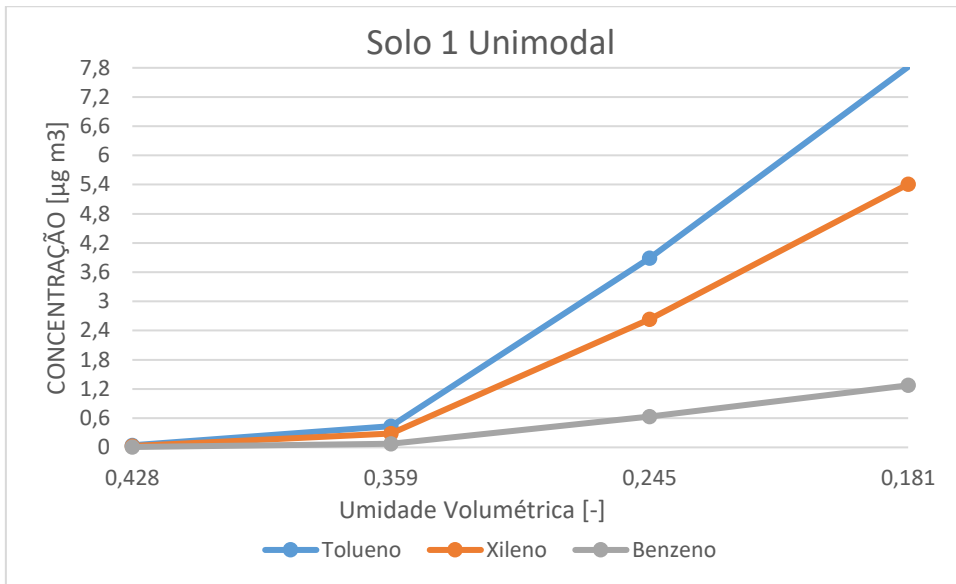


Gráfico 20: variação da concentração dos gases BTEX em ambiente fechado para o modelo unimodal do Solo 1.

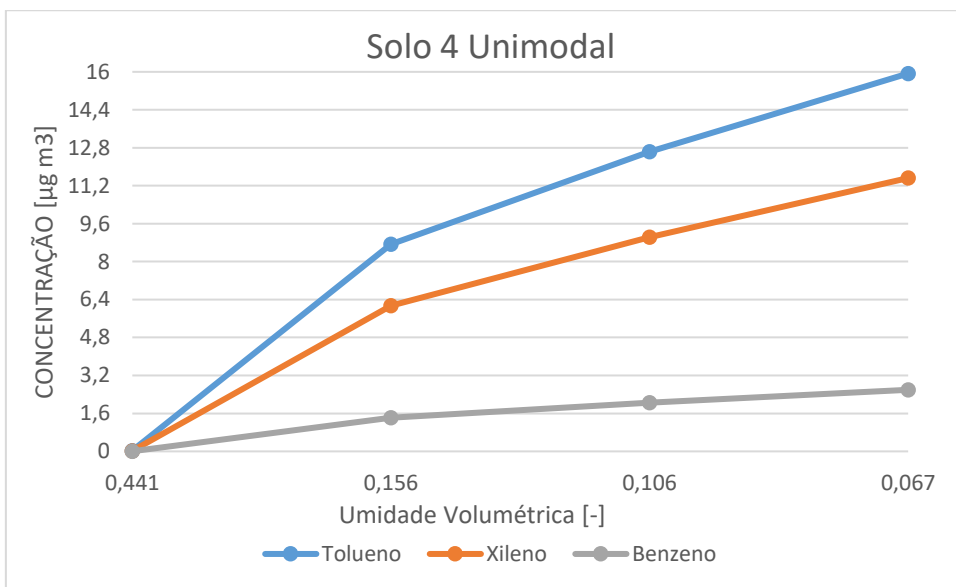


Gráfico 21: variação da concentração dos gases BTEX em ambiente fechado para o modelo unimodal do Solo 4.

5.2.2 Estimativa da Concentração de Vapores em Fonte Localizada a 0,75 Metros de Profundidade.

Os gráficos 22 a 27 mostram a estimativa de concentração de vapores em ambiente fechado a partir do cálculo proposto por Johnson & Ettinger (1991) e Alfaro Soto & Chang (2016) para fonte localizada 0,75 metros abaixo do nível térreo do edifício:

- **Benzeno**

Os gráficos 22 e 23 apresentam a variação da concentração final de Benzeno em ambiente fechado para os modelos uni e multimodais, em relação à variação da umidade do solo.

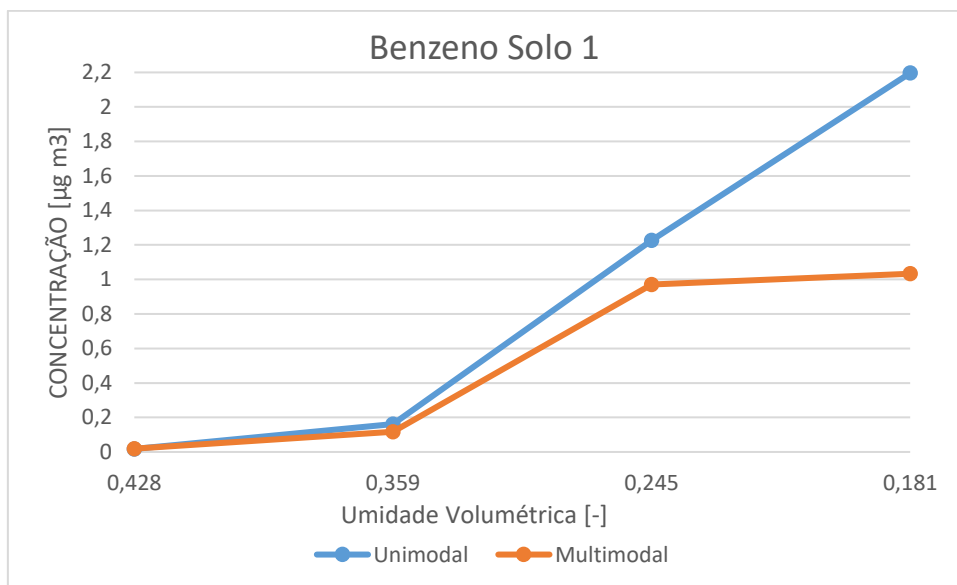


Gráfico 22: variação da concentração final de Benzeno em ambiente fechado para o Solo 1.

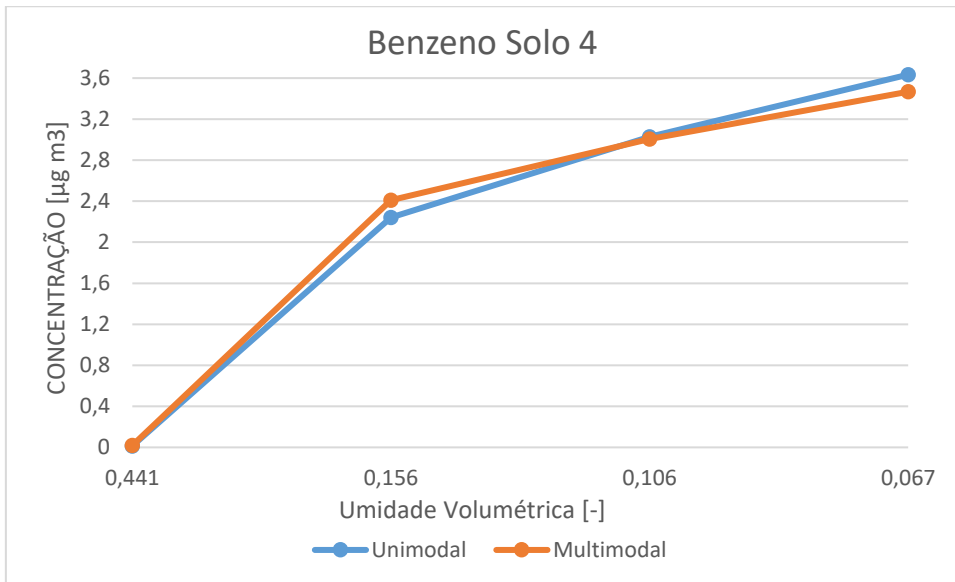


Gráfico 23: variação da concentração final de Benzeno em ambiente fechado para o Solo 4.

- **Tolueno**

Os gráficos 24 e 25 apresentam a variação da concentração final de Tolueno em ambiente fechado para os modelos uni e multimodais, em relação à variação da umidade do solo.

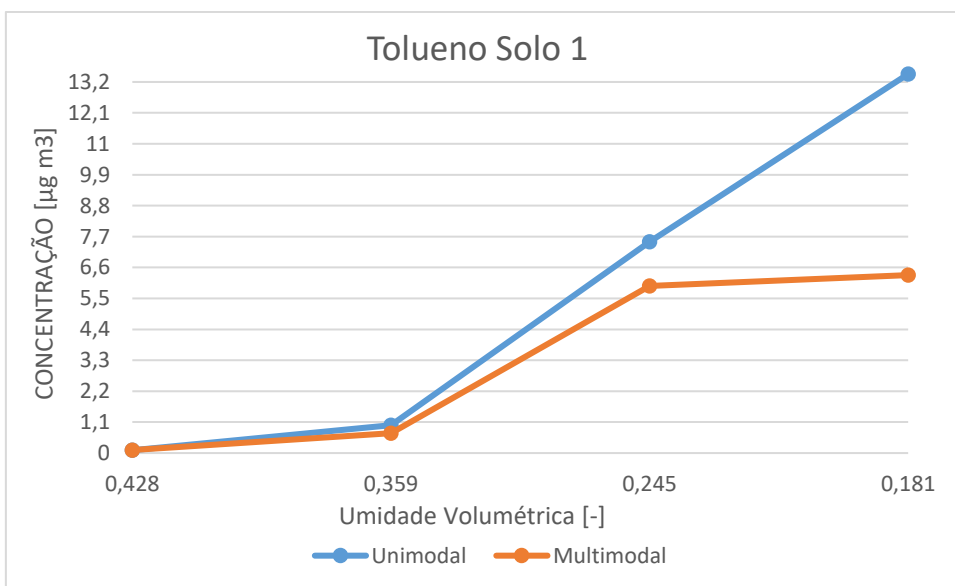


Gráfico 24: variação da concentração final de Tolueno em ambiente fechado para o Solo 1.

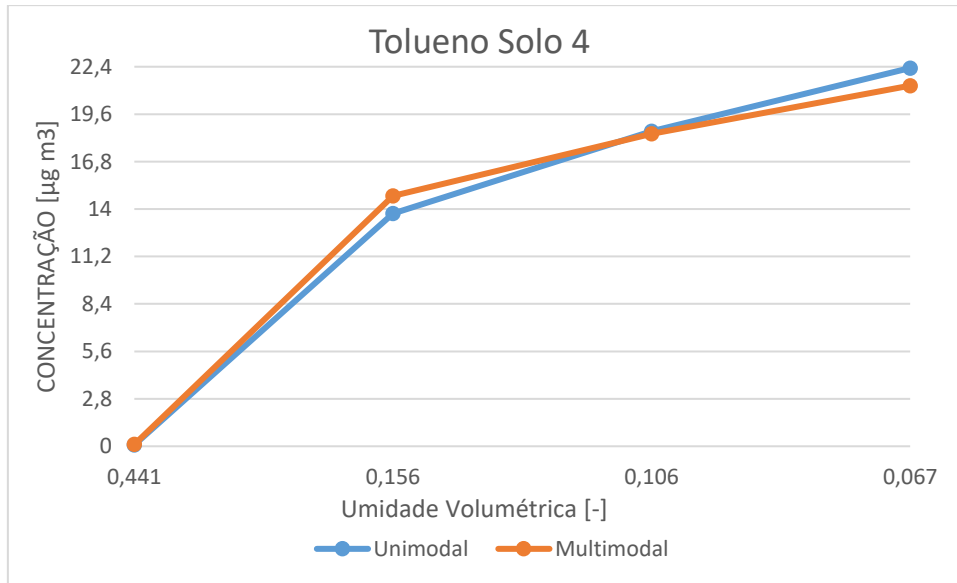


Gráfico 25: variação da concentração final de Tolueno em ambiente fechado para o Solo 4.

- **Xileno**

Os gráficos 26 e 27 apresentam a variação da concentração final de Xileno em ambiente fechado para os modelos uni e multimodais, em relação à variação da umidade do solo.

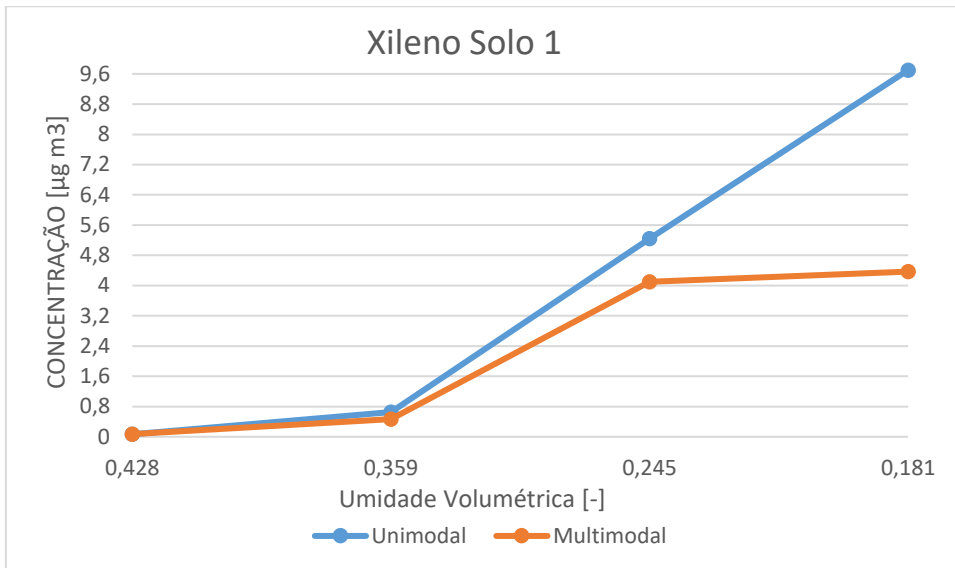


Gráfico 26: variação da concentração final de Xileno em ambiente fechado para o Solo 1.

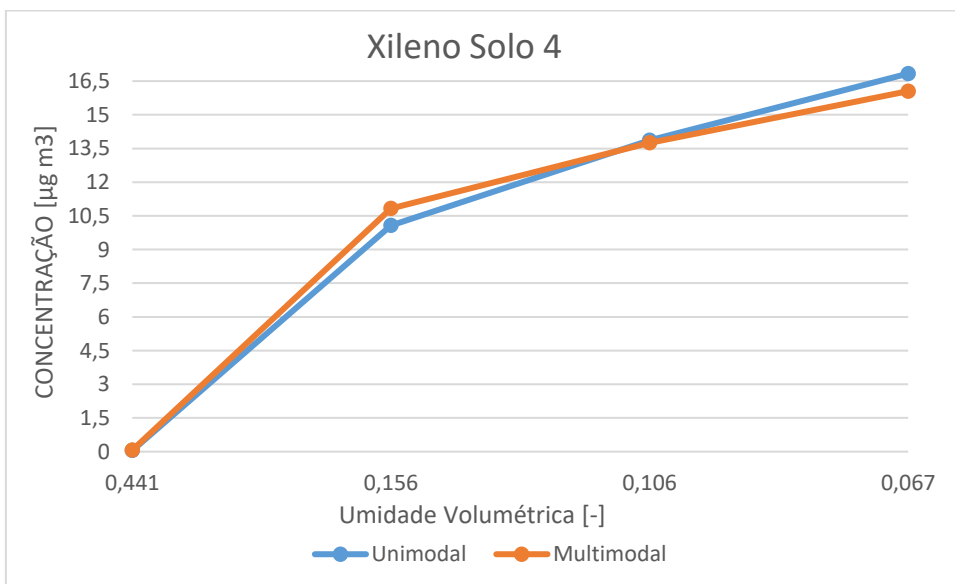


Gráfico 27: variação da concentração final de Xileno em ambiente fechado para o Solo 4.

Como apresentado no capítulo 4.2.5, os valores de umidade volumétrica escolhidos para geração dos gráficos foram estrategicamente posicionados em pontos nos quais há grande diferença de sucção entre os ajustes unimodais e bimodais na curva de retenção.

Desta forma, nota-se que o gás Tolueno apresenta a maior variação de concentração em ambiente fechado com a redução da umidade do solo. Além disso, o Benzeno se mostra como o gás menos sensível do grupo BTEX à variação de umidade do solo.

Quanto à comparação entre os modelos uni e multimodais apresentados nos gráficos 14 a 27, nota-se que em ambos os Solos e profundidades, o modelo unimodal apresentou maior concentração de gases em baixas umidades, sendo que a maior diferença de concentração se dá no Solo 1 (primeira modificação da Fm. Rio Claro) a profundidade de 0,75 metros.

O gás Tolueno apresenta a maior concentração no modelo unimodal do Solo 4 (22,32 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), sendo que a maior diferença entre os modelos uni e multimodais se dá para o gás Tolueno no Solo 1, com 13,48 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ no modelo unimodal *versus* 6,33 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ no modelo multimodal a 0,75 metros de profundidade, o que representa, nesse caso, uma variação de mais de 50%, corroborando com estes e outros autores (SMETTEN & KIRKBY, 1990; OTHMER et al, 1991; DURNER, 1994; MALLANTS et al, 1996; ALFARO SOTO & CHANG, 2013) quanto à magnitude do erro intrínseco ao cálculo de concentrações de vapores em solos com distribuição de poros multimodais utilizando-se os modelos tradicionais, unimodais. Ressalta-se que tal variação se dá com diferenças pequenas no valor de sucção (máximo de 153 cm) da curva de retenção, como é mostrado na tabela 1 do capítulo 4.2.5. Como referência, os valores orientadores da USEPA (2019) e CETESB (2019) para a concentração de Benzeno, por exemplo, que configuram risco carcinogênico são maiores ou iguais a 0,36 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ em ambiente fechado. Os gráficos 14 a 27 apresentados mostram que o valor de concentração citado foi facilmente excedido, especialmente quando a fonte se encontrava a 0,75 metros do nível térreo. Quando a fonte se encontrava 1,5 metros abaixo do nível do solo, o valor de referência citado só não foi excedido quando os Solos se encontravam no maior valor de umidade volumétrica.

Por fim, destaca-se que a comparação direta entre as concentrações finais dos gases em ambiente fechado para as duas diferentes profundidades apresentadas (0,75 e 1,5 metros) mostra que não existe uma relação direta entre a profundidade da fonte de compostos voláteis e sua concentração em ambiente fechado, o que quer dizer que, diminuir pela metade a profundidade da fonte não significa necessariamente dobrar a concentração final dos gases em ambiente fechado. No presente estudo, a diferença máxima de concentração dos gases com a variação da profundidade se deu para o gás Tolueno no modelo Unimodal do Solo 4, uma diferença de aproximadamente 70 %.

6.0 Conclusões.

O presente estudo mostrou diferentes aspectos para o uso de modelos uni e multimodais de distribuição de tamanhos de poro em solo para o cálculo de intrusão de vapores em ambientes fechados.

Apesar de serem necessários maiores estudos, este trabalho mostrou que o Método de Evaporação HYPROP poderia não ser capaz de reproduzir satisfatoriamente a bimodalidade no tamanho dos poros presentes nos solos, especialmente em altos valores de sucção (acima de 1000 centímetros). Quanto aos métodos indiretos, o ajuste realizado através do modelo bimodal de Durner (1994), ao contrário do modelo unimodal de Van Genuchten (1980), permitiu uma melhor reprodução aos dados obtidos indiretamente dos Solos estudados, se adequando de melhor forma aos solos lateríticos, comumente encontrados em regiões de clima tropical.

Os resultados obtidos nesse estudo permitem inferir que a aplicação do modelo indireto de Arya & Paris (1981) para determinação da curva de retenção de água no solo a partir das curvas granulométricas foi satisfatória, uma vez que os resultados originados com esse modelo foram coerentes com os dados experimentais obtidos por Alfaro Soto et al (2015) e Alfaro Soto (2004).

Para avaliar o fenômeno de intrusão de vapores em solos contaminados com LNAPL's (Líquido Não-Aquoso Menos Denso que a Água), utilizou-se o modelo proposto por Johnson & Ettinger (1991) e Alfaro Soto & Chang (2016), admitindo-se uma situação hipotética na qual os valores de concentração final foram obtidos para os gases do grupo BTEX (Benzeno, Tolueno e m-Xileno), reconhecidamente tóxicos e altamente voláteis, presentes nos hidrocarbonetos utilizados como combustível dos motores a combustão modernos. A fonte da contaminação, no modelo admitido, encontrava-se em duas profundidades diferentes; 1,5 e 0,75 metros abaixo do piso da edificação. Os demais valores de entrada admitidos no modelo de Johnson & Ettinger (unimodal) e Alfaro Soto & Chang (2016) (multimodal) são valores empiricamente obtidos e propostos pelos mesmos autores. O estudo foi realizado com dois

Solos diferentes, produzidos em laboratório com o fim de acentuar a bimodalidade na distribuição de poros, os Solos 1 e 4, e as análises foram feitas baseando-se no ajuste unimodal de Van Genuchten (1980) e bimodal de Durner (1994).

Os resultados obtidos mostraram que o Solo 4 apresentou as maiores concentrações finais dos gases em ambiente fechado, sendo que a maior dispersão de valores entre os modelos uni e bimodais se deu no gás Tolueno, com uma dispersão de aproximadamente 4%. Em contrapartida, o Solo 1 apresentou a maior dispersão entre os modelos uni e bimodais, também no gás Tolueno, através do qual obteve-se uma taxa de dispersão significativa, de mais de 50%, o que corrobora com estes e outros autores sobre o erro analítico intrínseco na adoção de modelos unimodais de distribuição de poros para análise de intrusão de vapores em solos com distribuição de poros multimodais, muito comuns na realidade brasileira. (SMETTEN & KIRKBY, 1990; OTHMER et al, 1991; DURNER, 1994; MALLANTS et al, 1996; ALFARO SOTO & CHANG, 2013)

Sendo assim, conclui-se que a adoção de modelos unimodais pode superestimar em mais de 50% a análise de intrusão de vapores em solos com distribuição de poros multimodal, e que há a necessidade de adequação dos modelos atualmente utilizados no Brasil (unimodais) para a realidade da maioria dos solos brasileiros, que apresentam distribuição de poros multimodais.

7.0 Referências bibliográficas.

ABREU, L., & SCHUVER, H. Conceptual model scenarios for the vapor intrusion pathway. *US EPA*, 2012.

ALFARO SOTO, M. A., BASSO, J. B., CHANG, H. K., & van Genuchten, M. T. Simulação de fluxo e transporte de íons de vinhaça através de vertente da formação Rio Claro. *Águas Subterrâneas*, 29(2), 162-174, 2015.

ALFARO 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.

ALFARO SOTO, M. A. Comparação entre métodos de imposição e de controle de sucção em ensaios com solos não saturados. 2004. Dissertação (Doutorado) – Curso de Geotecnia. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

ALFARO SOTO, M. 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.

ARAÚJO, C. B. C., & NETO, S. A. D. Caracterização de Solos Lateríticos para Utilização em Pavimentos de Baixo Custo na Cidade de Canindé/CE.

ARYA, L.M.; PARIS, J.F. A physicoempirical model to predict soil moisture characteristics from particle-size distribution and bulk density data. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v.45, p.1023-1030, 1981.

ARYA, L.M.; LEIJ, F. J.; VAN GENUCHTEN, M. T.; SHOUSE, P.J. Scaling parameter to predict the soil water characteristic from particle-size distribution data. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v.63, p.510-519, 1999.

ASCHEGRAU, Ann et al. Affinity for risky behaviors following prenatal and early childhood exposure to tetrachloroethylene (PCE)-contaminated drinking water: a retrospective cohort study. *Environmental health*, v. 10, n. 1, p. 102, 2011.

ASCHEGRAU, Ann et al. Long-term health effects of early life exposure to tetrachloroethylene (PCE)-contaminated drinking water: a retrospective cohort study. *Environmental health*, v. 14, n. 1, p. 36, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1984) – MB 28 NBR 6508: Determinação da Massa Específica.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1984) - MB 32 NBR 7181: Análise Granulométrica.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1986) - NBR 6457: Determinação do Teor de Umidade de Solos.

BACCHI, O. O., REICHARDT, K., 1993. Geometria fractal em física do solo. *Scientia Agricola*. Piracicaba, 50(2), 321-325. 1993.

BASILE, A.; D'URSO, G. Experimental corrections of simplified methods for predicting water retention curves in clay-loamy soils from particle-size determination. *Soil Technology*, Amsterdam, v.10, p.261-272, 1997.

BEAR, J. & CHENG, A. *Modeling Ground Water Flow and Contaminant Transport*. Ed, Springer, New York, NY. USA, 2010.

BEAR, J. (1961) On the tensor form of dispersion. *Journal of Geophysical Research*, 66, p.1185, 1197.

BEAR, J. *Dynamics of fluids in porous media*. New York: Dover Publications, 764 p. 1972.

BERNUCCI, L. L. B. *Considerações sobre o dimensionamento de pavimentos utilizando solos lateríticos para rodovias de baixo volume de trafego* (Doctoral dissertation, Universidade de São Paulo). 1995.

BEZERRA-COELHO, Camila R. et al. Further tests of the HYPROP evaporation method for estimating the unsaturated soil hydraulic properties. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, v. 66, n. 2, p. 161-169, 2018.

BONDER, B. H. *Curvas de retenção de água de um solo coluvionar de Campinas obtidas mediante técnicas de laboratório e de campo*, 2008.

BOULDING, J. Russell. *EPA environmental engineering sourcebook*. Routledge, 2019.

BUCKINGHAM, E. Studies on the movement of soil moisture. Bulletin 38. USDA, Bureau of Soils, Washington. 1907. 61p.

CERNANSKY, R. It came from beneath: detecting and mitigating vapor intrusion. *Environmental Health Perspectives*, 124(8), A141, 2016.

CHILDS, E. C. & COLLINS-GEORGE, N. The permeability of porous materials. *Roy. Soc. Proc.*, London, 201, p. 392-405, 1950.

CHILDS, E. C. The use of soil moisture characteristics in soil studies. *Soil Science*, v. 50, n. 4, p. 239-252, 1940.

CHIU, Sung Nok et al. *Stochastic geometry and its applications*. John Wiley & Sons, 2013.

DARCY, H. *Les fontaines publiques de la ville de Dijon*. Paris: Victor Dalmont, 1856. 647p.

DAWSON, Helen E.; KAPUSCINSKI, Richard B. *EPA's Vapor Intrusion Database: Evaluation and Characterization of Attenuation Factors for Chlorinated Volatile Organic Compounds and Residential Buildings*. US Environmental Protection Agency, Office of Solid Waste and Emergency Response, 2012.

DE BIASE, C. et al. Volatile organic compounds effective diffusion coefficients and fluxes estimation through two types of construction material. *Indoor Air*, v. 24, n. 3, p. 272-282, 2014.

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

EKLUND, Bart et al. Overview of state approaches to vapor intrusion. *Remediation Journal*, v. 22, n. 4, p. 7-20, 2012.

EL-SWAIFY, S. A.; HENDERSON, D. W. Water retention by osmotic swelling of certain colloidal clays with varying ionic composition. *Journal of Soil Science*, v. 18, n. 2, p. 223-232, 1967.

EPA, U. Municipal solid waste in the United States: 2000 facts and figures. Office of Solid Waste and Emergency Response (5305W), US EPA, 2002.

EPA, U. User's guide for evaluating subsurface vapor intrusion into buildings. Washington, DC, v. 204602004, 2004.

FOLKES, David et al. Observed spatial and temporal distributions of CVOCs at Colorado and New York vapor intrusion sites. *Groundwater Monitoring & Remediation*, v. 29, n. 1, p. 70-80, 2009.

FREDLUND, D.G., XING, A., HUANG, S.: Predicting the permeability function for unsaturated soils using the soil-water characteristic curve. *Canadian Geotechnical Journal*, n° 31, p. 533–546, 1994.

JARVIS, N. J. A review of non-equilibrium water flow and solute transport in soil macropores: principles, controlling factors and consequences for water quality. *European Journal of Soil Science*, v.58, n.3, p.523-546, 2007.

JOHNSON, P. C.; ETTINGER, R. A. Heuristic model for predicting the intrusion rate of contaminant vapors into buildings. *Environmental Science & Technology*, v. 25, n. 8, p. 1445-1452, 1991.

JOHNSON, P. C. Users guide for the Johnson and Ettinger (1991) model for subsurface vapor intrusion into buildings. US EPA, Office of Emergency and Remedial Response, p. 98, 1997.

JUNIOR, R.; ROBERTO, P.. Avaliação do comportamento mecânico de um solo arenoso fino laterítico reforçado com fibras para uso em pavimentação. 2008. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

LEVANTAMENTO PEDOLOGICO SEMIDETALHADO DO ESTADO DE SÃO PAULO.

Serviço Nacional de Levantamento e Conservação do Solo. Instituto Agrônomo. Quadricula II São Carlos, Memorial Descritivo, Campinas n°98, 188p. Escala 1:100.000, 1984.

LOUREIRO, Celso O. et al. Three-dimensional simulation of radon transport into houses with basements under constant negative pressure. *Environmental Science & Technology*, v. 24, n. 9, p. 1338-1348, 1990.

MALLANTS, D.; TSENG, P. H.; TORIDE, N.; TIMMERMAN, A.; FEYEN J. Evaluation of multimodal hydraulic functions in characterizing a heterogeneous field soil. *Journal of hydrology*, 95, 172-199, 1997.

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

MALLANTS, Dirk et al. Spatial variability of hydraulic properties in a multi-layered soil profile. *Soil Science*, v. 161, n. 3, p. 167-181, 1996.

MARIANO, A. P., Avaliação do Potencial de Biorremediação de Solos e de Águas Subterrâneas Contaminados com Óleo Diesel. Tese de Doutorado - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista – Rio Claro, 2006.

MCHUGH, Thomas; LOLL, Per; EKLUND, Bart. Recent advances in vapor intrusion site investigations. *Journal of environmental management*, v. 204, p. 783-792, 2017.

MIGUEL, M. G.; TEIXEIRA, R. S.; PADILHA, A. C. C. Curvas características de sucção de solo laterítico da região de Londrina-PR. *Revista de Ciência e Tecnologia*, 12 (24), 63-74, 2006.

NAZAROFF, W. W. et al. Experiments on pollutant transport from soil into residential basements by pressure-driven airflow. *Environmental science & technology*, v. 21, n. 5, p. 459-466, 1987.

NOGAMI, J. S., & VILLIBOR, D. F. Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos. *São Paulo: Villibor*, 213, 1995.

NOGAMI, J. S., & VILLIBOR, D. F. Uma nova classificação de solos para finalidades rodoviárias. *Anais Simpósio Brasileiro de Solos Tropicais em Engenharia*, 1, 30-41, 1981.

NOGUEIRA, J. B. Mecânica dos solos: ensaios de laboratório, 2005.

OTHMER, H.; DIEKKRUGER, B. and KUTILEK, M. Bimodal porosity and unsaturated hydraulic conductivity. *Soil Sci.*, 152, 139-149, 1991.

PERTASSEK, T.; PETERS, A.; DURNER, W. HYPROP Data Evaluation Software, User's Manual. Umwelt Monitoring Systeme GmbH, München, Germany, 2011.

PETERS, A.; DURNER, W. Simplified evaporation method for determining soil hydraulic properties. *Journal of Hydrology*, v. 356, n. 1-2, p. 147-162, 2008.

PUTZMANN, Thomas et al. „Soil Vapour Intrusion “–A new model for the determination of indoor air concentrations. *Águas Subterrâneas*, 2011.

REEVE, M. J.; SMITH, P. D.; THOMASSON, J. The effect of density on water retention properties of field soils. *Journal of soil science*, v. 24, n. 3, p. 355-367, 1973.

SALTER, P. J.; WILLIAMS, J. B. The influence of texture on the moisture characteristics of soils: II. Available-water capacity and moisture release characteristics. *Journal of Soil Science*, v. 16, n. 2, p. 310-317, 1965.

SANTOS, Eliana Fernandes dos. Estudo comparativo de diferentes sistemas de classificações geotécnicas aplicadas aos solos tropicais. 2006. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

SHARMA, Munna Lal; UEHARA, Goro. Influence of Soil Structure on Water Relations in Low Humic Latosols: I. Water Retention 1. Soil Science Society of America Journal, v. 32, n. 6, p. 765-770, 1968.

SCHINDLER, Uwe et al. The evaporation method: Extending the measurement range of soil hydraulic properties using the air-entry pressure of the ceramic cup. Journal of plant nutrition and soil science, v. 173, n. 4, p. 563-572, 2010.

SMETTEM, K. R. J.; KIRKBY, C. Measuring the hydraulic properties of a stable aggregate soil. J. Hydrology, 177, 1-13, 1990.

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

SOTO, M. A. A.; KIANG, C. H. Vapor intrusion in soils with multimodal pore-size distribution. In: Web of Conferences. EDP Sciences, 2016. p. 07002.

SOUSA A.C.R.C.; MASCARENHA M.M.A.; JESUS A.S.; SILVA M.R. 2016. Influência da Sucção na Estabilidade Estrutural de Solos Tropicais Não Saturados no Município de Silvânia-GO. XVIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. O Futuro Sustentável do Brasil passa por Minas COBRAMSEG 2016, 19-22 October, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brazil.

THOMAS, G. W.; MOODY, J. E. Chemical Relationships Affecting the Water-Holding Capacities of Clays 1. Soil Science Society of America Journal, v. 26, n. 2, p. 153-155, 1962.

TULLER, M.; OR, D. Water films and scaling of soil characteristic curves at low water contents. *Water Resources Research*, v. 41, n. 9, 2005.

US Environmental Protection Agency (US EPA). *Background Indoor Air Concentrations of Volatile Organic Compounds in North American Residences (1990–2005): A Compilation of Statistics for Assessing Vapor Intrusion*. Washington, DC: Office of Solid Waste and Emergency Response, 2011.

US Environmental Protection Agency (US EPA). *OSWER Technical Guide for Assessing and Mitigating the Vapor Intrusion Pathway From Subsurface Vapor Sources To Indoor Air*, 2015.

VAN GENUCHTEN, M. T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, vol. 44, n 5, pp. 892 - 898, 1980.

VILLIBOR, D. *Utilização de solos arenosos finos na execução de bases para pavimentos de baixo custo*, 1974.

8.0 Anexo I: Tabela de Dados Químicos dos Contaminantes Gasosos.

Tabela 11: Dados químicos de entrada para o modelo de Johnson & Ettinger (1991) e Alfaro Soto & Chang (2016).

Simbolo	Parâmetro	Und			
	CAS Number	#	71432	108383	108883
-	Nome do SQI	-	Benzeno	m-Xileno	Tolueno
$DH_{v,b}$	Entalpia de vaporização para o normal ponto de ebulição	cal mol ⁻¹	7342	8523	7930
T_C	Temperatura critica	°K	562,16	617,05	591,79
T_B	Normal ponto de ebulição	°K	353,25	412,25	383,78
H	Constante de Henri para a temperatura de referência, atm m ³ mol ⁻¹	atm m ³ mol ⁻¹	5,62E-03	7,09E-03	5,87E-03
T_R	Temperatura de referência para a constante de Henri	°C	25	25	25
Da	Difusividade no ar	cm ² .s ⁻¹	8,80E-02	7,00E-02	8,70E-02
Dw	Difusividade na água	cm ² .s ⁻¹	9,80E-06	7,80E-06	8,60E-06
$D_{concret}^{eff}$	Coefficiente de difusão efetiva do concreto ou algum tipo de camada isolante	cm ² .s ⁻¹	8,90E-04	8,20E-04	8,53E-04
C_s	Concentração no solo	mg /m ³	1500	7586	9300
T_s	Temperatura na água subterrânea ou no solo	°C	15	15	15

9.0 Anexo II: Tabela dos Dados de Entrada dos Solos para o Modelo de Johnson & Ettinger (1991).

Tabela 12: Dados de entrada dos Solos utilizados no presente estudo, a partir do modelo de Johnson & Ettinger (1991) e Alfaro Soto & Chang (2016).

Simbol o	Parâmetros	Und	Solo 1/4	Solo 1/4
-	Classificação de solos (desde a superfície até o N.A)	-	Areia argilosa	Areia argilosa
L_i	Espessura de cada camada - Desde a superfície do terreno	m	0,75/ 0,375	0,75/ 0,375
h_{nsat}	Pressão capilar do solo não saturado	cm	51	51
q_s	Umidade volumetrica de saturação	$cm^3.cm^{-3}$	0,4176	0,4176
q_r	Umidade volumetrica residual	$cm^3.cm^{-3}$	0,00004	0,00004
w_1	Fator de ajuste 1	-	0,63403	0,63403
N_1	Parâmetro "N" de van Genuchten	-	6,55390	6,55390
M_1	Parâmetro "M" de van Genuchten	-	0,23800	0,23800
a_1	Parâmetro "a" de van Genuchten	cm^{-1}	0,02169	0,02169
w_2	Fator de ajuste 2	-	0,36598	0,36598
N_2	Parâmetro "N" de van Genuchten	-	2,11422	2,11422
M_2	Parâmetro "M" de van Genuchten	-	0,52701	0,52701
a_2	Parâmetro "a" de van Genuchten	cm^{-1}	0,00001	0,00001
w_3	Fator de ajuste 1	-	0,00000	0,00000
N_3	Parâmetro "N" de van Genuchten	-	1,00000	1,00000
M_3	Parâmetro "N" de van Genuchten	-	1,00000	1,00000

a_3	Parâmetro "a" de van Genuchten	cm ⁻¹	1,00000	1,00000
K_s	Concutividade hidráulica saturada	cm/h	14,27	14,27
R	Raio medio dos poros interpartículas	cm	0,038583	0,032193