

Muriel Edyth Lumsden Szymanski Patricio

Modelagem matemática do transporte de óleo mineral isolante na zona não saturada: estudo de caso em subestações de energia elétrica

Dissertação submetida ao Programa Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Ambiental

Orientador: Prof. Dr. Henry Xavier Corseuil

Coorientador: Eng. Dr. Marcio Roberto Schneider e Prof. Dr. Konrad Miotlinski.

Florianópolis
2019

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Patricio, Muriel Edyth Lumsden Szymanski
Modelagem matemática do transporte de óleo
mineral isolante na zona não saturada: estudo de
caso em subestações de energia elétrica / Muriel
Edyth Lumsden Szymanski Patricio ; orientador,
Prof. Dr. Henry Xavier Corseuil, coorientador,
Eng. Dr. Marcio Roberto Schneider , coorientador,
Prof. Dr. Konrad Miotlinski, 2019.
130 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de
Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós
Graduação em Engenharia Ambiental, Florianópolis,
2019.

Inclui referências.

1. Engenharia Ambiental. 2. Óleo mineral
isolante. 3. Infiltração. 4. Zona não saturada. I.
Corseuil, Prof. Dr. Henry Xavier . II. Schneider ,
Eng. Dr. Marcio Roberto . III. Miotlinski, Prof.
Dr. Konrad IV. Universidade Federal de Santa
Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Ambiental. V. Título.



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL
CENTRO TECNOLÓGICO



**“MODELAGEM MATEMÁTICA DO TRANSPORTE DE ÓLEO MINERAL
ISOLANTE NA ZONA NÃO SATURADA: ESTUDO DE CASO EM
SUBESTAÇÕES DE ENERGIA ELÉTRICA”**

MURIEL EDYTH LUMSDEN SZYMANSKI PATRÍCIO

Dissertação submetida ao corpo docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de

MESTRE EM ENGENHARIA AMBIENTAL

na Área de Engenharia Ambiental.

Aprovado por:


Prof.ª Maria Eliza Nagel Hassener
Orientadora de Pós-Graduação (PPGEA)
39/2019/GR


Prof. Dr. Konrad Zienkowitz Miodlinski
(coorientador)


Dr. Mardo Schneider
(coorientador)


Prof. Dr. Alexandra Rodrigues Finotti


Prof.ª Dr.ª Gracieli Dienemann


Prof. Dr. Arcângelo Loss


Prof.ª Dr.ª Maria Eliza Nagel Hassener
(Coordenadora)

FLORIANÓPOLIS, SC – BRASIL
MARÇO/2019

AGRADECIMENTOS

Aos Professores Henry X. Corseuil, Marcio Schneider e Konrad Miotlinski pela orientação no mestrado, e por serem de fundamental importância para a realização dessa pesquisa.

Ao CNPq pela bolsa de pesquisa e à Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) que proporcionaram toda a infraestrutura para a realização do mestrado em Engenharia Ambiental.

À banca examinadora, pela disponibilidade.

À toda equipe do REMA pelo aprendizado, amizade, confiança e paciência. Obrigada por me ajudarem a evoluir diariamente.

À minha mãe e minha irmã, por todo apoio, carinho, confiança e amor incondicional, sempre me ajudando a tornar realidade todas as minhas ideias e os meus desafios.

Ao meu namorado Gustavo, pela confiança, amor e suporte nessa etapa, e em tantas outras, sempre me ajudando a evoluir tanto pessoalmente, como profissionalmente.

A todos os meus amigos que me acompanharam, mesmo à distância, nessa etapa, sempre dando suporte e tornando a caminhada mais fácil, em especial à Barbara, Thais, Gabriela, Daphine, Irma, Júlia e Drielly. Gratidão por todo o amor e esses anos de amizade.

“The more clearly we can focus our attention on the wonders and realities of the universe, the less taste we shall have for destruction.”
(Rachel Carson)

RESUMO

Acidentes ou falhas em equipamentos elétricos em subestações de energia podem resultar em vazamentos de óleo mineral isolante (OMI), ocasionando contaminação do solo e da água subterrânea. A modelagem matemática, entre outras funções, é uma importante ferramenta para a previsão dos impactos destes vazamentos e para a determinação do tempo de resposta das ações emergenciais. Um dos *softwares* mais utilizados na simulação de fluidos apolares, imiscíveis em água (petróleo e derivados) é o *Hydrocarbon Spill Screening Model* (HSSM), distribuído pela U.S. EPA. Esse e outros *softwares*, baseados nas formulações matemáticas de Green-Ampt e de Nutting, consideram que a mobilidade dos fluidos líquidos é função da densidade, viscosidade e da permeabilidade intrínseca dos meios porosos,. Contudo, trabalhos impiricos apresentados na literatura demonstram que, no caso da infiltração de diesel e gasolina em colunas preenchidas com argila expansiva, a constante dielétrica dos fluidos apolares pode influenciar o transporte na zona não saturada, incrementando a condutividade hidráulica em até três ordens de grandeza. Desta forma, os *softwares* disponíveis no mercado não quantificam adequadamente a condutividade hidráulica de OMI na presença de argilominerais expansivos. O objetivo desse estudo contemplou o desenvolvimento de um novo algoritmo para determinação da condutividade hidráulica do OMI na zona não saturada de solos argilosos expansivos, considerando a influência da constante dielétrica do fluido. Como estudo de caso, foram realizadas simulações matemáticas em dezessete subestações de energia elétrica empregando o *software* HSSM e o novo algoritmo. Os resultados demonstraram que a condutividade hidráulica ao OMI, simulada com o novo algoritmo, foi até 1.000 vezes superior aos resultados obtidos com o *software* HSSM, corroborando com os resultados experimentais da literatura. A discrepância entre as condutividades hidráulicas ao OMI possui implicações práticas na elaboração de planos de ações emergenciais, visto que as baixas condutividades hidráulicas ao óleo, implicam na redução do fluxo do fluido na zona não saturada, e conseqüentemente, acabam por subestimar a taxa de infiltração.

Palavras-Chaves: Óleo mineral isolante, Infiltração, Zona não saturada

ABSTRACT

Accidents or failures in electrical equipment in energy substations can result in leakage of insulating mineral oil (OMI), causing contamination of soil and groundwater. Mathematical modeling, among other functions, is an important tool to predict the impacts of these leaks and to determine the response time of emergency actions. One of the most widely used software for the simulation of water-immiscible apolar fluids (petroleum, and derivatives) is the Hydrocarbon Spill Screening Model (HSSM), distributed by U.S. EPA. This and other software, based on the mathematical formulations of Green-Ampt and Nutting, consider that the mobility of liquid fluids is a function of the density, viscosity and intrinsic permeability of porous media. However, experimental studies presented in the literature show that, in the case of infiltration of diesel and gasoline in columns filled with expansive clay, the dielectric constant of the apolar fluids can influence transport in the unsaturated zone, increasing the hydraulic conductivity up to three orders of magnitude. Therefore, the software available on the market does not adequately quantify the hydraulic conductivity of OMI in the presence of expansive clay minerals. The objective of this study was the development of a new algorithm for determination of the hydraulic conductivity of the OMI in the unsaturated zone of expansive clayey soils, considering the influence of the dielectric constant of the fluid. As a case study, mathematical simulations were performed at seventeen electric power substations using the HSSM software and the new algorithm. The results showed that the hydraulic conductivity to the OMI, simulated with the new algorithm, was up to 1,000 times higher than the results obtained with the HSSM software, corroborating with the experimental results of the literature. The discrepancy between the hydraulic conductivities of the OMI has practical implications in the development of emergency action plans, since the low hydraulic conductivities to the oil imply in the reduction of the fluid flow in the unsaturated zone and, consequently, they end up underestimating the infiltration rate.

Key-Word: insulating mineral oil; infiltration; unsaturated zone.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1. Processo de distribuição brasileira de energia elétrica.....	33
Figura 3.2. Transformador de instrumento.....	33
Figura 3.3. Transformador de potência.	33
Figura 3.4. Sistema de proteção contra incêndio (bacias coletoras).....	36
Figura 3.5. Transporte do LNAPL em zona não-saturada e zona saturada.	39
Figura 3.6. Ângulo de contato (β) do fluido em tubos capilares.	41
Figura 3.7. Raio de curvatura dos fluidos com o meio poroso.....	41
Figura 3.8. Classificação da textura do solo em função dos tamanhos das partículas.	42
Figura 3.9. Estrutura dos argilominerais filossilicatos bilaminares e trilaminares.....	43
Figura 3.10. Curva de retenção obtida a partir dos dados de Hodnett e Tomasella, (2002).....	47
Figura 3.11. Validação do modelo matemático HSSM.	56
Figura 3.12. Verificação da equação de Green-Ampt (1911) utilizada no OILSFSM. a) Altura da lâmina de óleo b) Infiltração.....	58
Figura 4.1. Fluxograma para o desenvolvimento do algoritmo de migração de LNAPL na zona não saturada.	61
Figura 4.2. Modelo esquemático do escoamento do LNAPL em zona não saturada.....	62
Figura 4.3. Fluxograma da metodologia aplicada para a determinação da frente de escoamento. Legenda: Rosa-dados obrigatório; Laranja – dados opcionais; Verde – Parâmetros intermediários; Azul -Parâmetros finais.	66
Figura 4.4. Fluxograma das etapas da análise de sensibilidade.....	69
Figura 4.5. Coletas de campo para as análises de densidade aparente, granulometria e índice de plasticidade. a) Anel volumétrico para a coleta de solo. b) Amostra de solo indeformada, coletada para a análise granulométrica.....	72
Figura 4.6. Ensaio com o permeâmetro Guelph.	73
Figura 5.1. Modelo conceitual utilizado para a construção do algoritmo.	75

Figura 5.2. Resultados da frente de migração das simulações (A, B, C e D) para o cenário I.	83
Figura 5.3. Resultados da frente de migração das simulações (A, B, C e D) para o cenário II.	84
Figura 5.4. <i>Box Plot</i> dos resíduos entre os resultados do HSSM e do algoritmo proposto.	85
Figura 5.5. Comparação entre os resultados das frentes de migração obtidos pelo HSSM e pelo Algoritmo proposto.	86
Figura 5.6. Resultado das simulações no HSSM para a verificação da frente de escoamento no primeiro ponto de análise. As cores das legendas das curvas: Vermelho (Cenário I); Azul (Cenário II); Verde (Cenário III); Laranja (Cenário IV).	88
Figura 5.7. Histograma das frequência dos tempos (s) obtidos, em segundos, como resultado da aplicação do <i>bootstrap</i> para as variáveis: porosidade (η), índice de plasticidade (IP), saturação de água (<i>Sw</i>), saturação residual de água (<i>Swr</i>), saturação residual de óleo (<i>Sor</i>), condutividade hidráulica à água (<i>Kw</i>) e altura da lâmina de óleo na superfície (Hs).	91
Figura 5.8. Classificação das texturas dos solos das subestações.	93
Figura 5.9. Resultados das análises do índice de plasticidade e da condutividade hidráulica por subestação de energia elétrica 96	96
Figura 5.10. Resultados das análises da porosidade e da condutividade hidráulica por subestação de energia elétrica.	96
Figura 5.11. Comparação entre os valores de Condutividade hidráulica ao óleo ao solo quando calculado com a equação de Machado <i>et al.</i> (2016), e a equação de Nutting (1934).	100
Figura 5.12. Comparação entre os valores da condutividade hidráulica ao óleo obtida pela equação de Machado <i>et al.</i> (2016) e pela equação de Nutting (1934) com a condutividade hidráulica à água 100	100
Figura 5.13. Comparação entre as frentes de migrações do óleo mineral isolante obtido por meio do HSSM (verde) e do algoritmo (vermelho) (CONTINUAÇÃO).	102

Figura 5.14. Comparação entre as frentes de migrações do óleo mineral isolante obtido por meio do HSSM (verde) e do algoritmo (vermelho) (CONTINUAÇÃO).....	103
Figura 5.15. Comparação entre as frentes de migrações do óleo mineral isolante obtido por meio do HSSM (verde) e do algoritmo (vermelho) (CONTINUAÇÃO).....	104
Figura 5.16. Comparação entre as frentes de migrações do óleo mineral isolante obtido por meio do HSSM (verde) e do algoritmo (vermelho) (CONTINUAÇÃO).....	105
Figura 5.17. Resultado das simulações, utilizando o algoritmo, para as subestações de acordo com a saturação de água no solo.....	107
Figura 5.18. Resultados das simulações das frentes de migração obtidos por meio do algoritmo.	110
Figura 5.19. Resultados das simulações das frentes de migração obtidos por meio do algoritmo (CONTINUAÇÃO).	111
Figura 5.20. Resultados das simulações das frentes de migração obtidos por meio do algoritmo (CONTINUAÇÃO).	112

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1. Propriedade do óleo mineral isolante de transformadores. . 35	
Tabela 3.2. Altura da franja capilar em amostras de solo com diferentes tamanhos de partículas após 72 dias de análises. 38	
Tabela 3.3. Densidade, viscosidade cinética, viscosidade dinâmica e mobilidade dos fluidos em estudo, a 20°C. 41	
Tabela 3.4. Caracterização dos índices de plasticidade. 45	
Tabela 3.5. Média e desvio padrão dos parâmetros de Van Genuchten para os solos tropicais. 47	
Tabela 3.6. Comparação de vantagem e desvantagem dos <i>softwares</i> utilizados na migração de LNAPL. 54	
Tabela 3.7. Dados utilizados para a validação do <i>software</i> HSSM. 56	
Tabela 3.8. Resultados obtidos na validação do HSSM. 57	
Tabela 4.1. Principais equações utilizadas no desenvolvimento do novo algoritmo 65	
Tabela 4.2. Parâmetros de simulação utilizados para a comparação do algoritmo proposto e do <i>software</i> HSSM 68	
Tabela 4.3. Parâmetros utilizados para a análise de sensibilidade do <i>bootstrap</i> 70	
Tabela 4.4. Principais propriedades dos fluidos em estudo. 73	
Tabela 5.1. Descrição dos dados de entrada do algoritmo. 76	
Tabela 5.2. Descrição dos parâmetros de saída do algoritmo. 79	
Tabela 5.3. Resultados dos parâmetros: condutividade hidráulica ao óleo, condutividade efetiva do óleo e saturação do óleo para o algoritmo (python) e HSSM. 81	
Tabela 5.4. Análise estatística dos resultados obtidos nas simulações do algoritmo e no HSSM. 82	
Tabela 5.5. Parâmetros de variação para simulações no <i>software</i> HSSM. 87	
Tabela 5.6. Exemplo dos tempos, em segundos, obtidos para 0,2 cm de infiltração 89	
Tabela 5.7. Análise estatística dos parâmetros utilizados para a análise de sensibilidade (<i>bootstrap</i>). 91	

Tabela 5.8. Caracterização das condições do solo das subestações durante a coleta e o ensaio de permeâmetro Guelph e a textura do solo obtida por meio da análise granulométrica.	93
Tabela 5.9. Resumo dos parâmetros das Subestações de Energia Elétrica.	94
Tabela 5.10. Parâmetros utilizados nas simulações dos estudos de caso	97
Tabela 5.11. Comparação entre os valores de condutividade da água e condutividade hidráulica ao óleo obtido pelas equações de Machado <i>et al.</i> (2016) e Nutting (1934).	99
Tabela 5.12. Resumo das profundidades alcançadas na simulação no algoritmo proposto.	114
Tabela 5.13. Caracterização da frente de escoamento final das simulações no algoritmo proposto.	114

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1: Perturbações em transformadores nas subestações elétricas e linhas de transmissão.....	127
---	-----

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

Símbolo	Descrição	Dimensão
α	Constante empírica de Van Genuchten	1/L
β	Ângulo de contato do fluido em tubos capilares	NA
%Ar	Porcentagem de Areia	NA
% Si	Porcentagem de Silte	NA
% Ag	Porcentagem de Argila	NA
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas.	NA
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica.	NA
ANP	Agência Nacional de Petróleo.	NA
ASTM	American Society for Testing and material.	NA
CELESC	Central Elétrica de Santa Catarina.	NA
DNAPL	<i>Dense non-aqueous phase liquid.</i>	NA
d_{10}	Diâmetro efetivo da partícula	cm
ϵ_w	Constante dielétrica da água.	NA
ϵ_o	Constante dielétrica do óleo.	NA
HSSM	<i>Hydrocarbon spill screening model.</i>	NA
H_s	Altura da lâmina de óleo na superfície	L
H	Pressão exercida pelo LNAPL em determinado ponto.	L
H_f	Pressão capilar na frente de escoamento.	L
h_c	Altura da franja capilar	L
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.	NA
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers.</i>	NA
IP	Índice de Plasticidade.	NA
θ_v	Conteúdo volumétrico	NA
θ_r :	Conteúdo volumétrico residual	NA
θ_s	Conteúdo volumétrico de saturação	NA
$\psi_{(eao)}$	Sucção efetiva ar- LNAOL	
$\psi_{(aw)}$	Pressão de entrada capilar ar-água.	L
$\psi_{(ao)}$	Pressão de entrada capilar ar-óleo.	L
K_{eo}	Condutividade efetiva do LNAPL	L/T
k_o	Permeabilidade intrínseca do LNAPL	L ²
k_w	Permeabilidade intrínseca da água	L ²
K_{rw}	Permeabilidade relativa da água	NA
K_{ro}	Permeabilidade relativa do LNAPL	NA
K_{so}	Condutividade hidráulica do meio poroso ao LNAPL	L/T
K_{sw}	Condutividade hidráulica saturada à água	L/T
$Kurt_{bootstrap}$	Curtozes do bootstrap	
LL	Limite de Liquidez.	NA
LNAPL	<i>Light non-aqueous phase liquid</i>	NA
LP	Limite de Plasticidade.	NA

Símbolo	Descrição	Dimensão
$med_{bootstrap}$	Mediana do Bootstrap	NA
m	Constante empírica de Van Genuchten	NA
n	Constante empírica de Van Genuchten	NA
η	Porosidade	NA
S_w	Saturação de águaL	NA
S_{rw}	Saturação residual de água	NA
S_o	Saturação do LNAPL	NA
S_{ro}	Saturação residual do LNAPL	NA
U.S.E.P. A	<i>United States Environmental Protection Agency</i>	NA
λ	Índice de distribuição do tamanho dos poros (Brooks-Corey)	NA
γ_o	Tensão interfacial do LNAPL	$10^{-3}M/T^2$
γ_w	Tensão interfacial da água	
σ_o	Tensão superficial do LNAPL	$10^{-5}M/T^2$
σ_w	Tensão superficial da água	$10^{-5}M/T^2$
$\sigma_{amostra}$	Desvio padrão da amostra	NA
$\sigma_{bootstrap}$	Desvio padrão do <i>bootstrap</i>	NA
μ_o	Viscosidade dinâmica do LNAPL	$M(LT)^{-1}$
μ_w	Viscosidade dinâmica da água	$M(LT)^{-1}$
$\mu_{amostra}$	Média da amostra	NA
$\mu_{bootstrap}$	Média do bootstrap	NA
r_u	Raio de curvatura dos fluídos na parte superior	
r_l	Raio de curvatura dos fluídos na parte inferior	
ν_o	Viscosidade cinética do LNAPL	L^2/T
ν_w	Viscosidade cinética da água	L^2/T
P_c	Pressão capilar	
ρ_a	Densidade do solo	M/L^3
ρ_p	Densidade da partícula	M/L^3
ρ_o	Densidade do fluido do LNAPL	M/L^3
ρ_w	Densidade do fluido da água	M/L^3
t_d	Tempo de discretização	T
OILSFM	Oil Surface Flow Screening Model	NA

L: Comprimento; T: Tempo; M: Massa; NA: Não Aplicável

Sumário

1.	Introdução	27
2.	Objetivos.....	31
2.1.	Objetivo Geral	31
2.2.	Objetivos específicos.....	31
3.	Revisão bibliográfica	33
3.1.	Caracterização dos óleos minerais isolantes.....	34
3.2.	Legislação e normas preventivas acerca das subestações elétricas	36
3.3.	Processos físicos do transporte de <i>light non aqueous phase liquid</i> (LNAPL) nos solos argilosos.....	37
3.3.1.	Propriedades dos fluidos e suas implicações na infiltração na zona não saturada.....	39
3.3.2.	Caracterização dos meios porosos.....	42
3.3.3.	Migração dos fluidos na zona não saturada.....	45
3.4.	<i>Softwares</i> para a modelagem de migração de LNAPL em zona não saturada	53
3.4.1.	<i>Hydrocarbon Spill Screening Model</i> (HSSM)	54
3.4.2.	<i>Oil Surface Flow Screening Model</i> – OILSFM.....	57
3.4.3.	Software: <i>Mineral Oil Spill Evaluation System</i> -MOSES	58
3.4.4.	Outros modelos de infiltração de LNAPL na zona não saturada	58
4.	Materiais e Métodos.....	61
4.1.	Desenvolvimento do algoritmo de infiltração de LNAPL na zona não saturada.	62
4.2.	Comparação e verificação do algoritmo de infiltração de LNAPL com o <i>software</i> HSSM.....	67
4.3.	Análise de sensibilidade do algoritmo.....	68

4.4.	Estudo de caso aplicado ao algoritmo proposto	70
4.4.1.	Modelo conceitual.....	70
4.4.2.	Caracterização do solo	71
4.4.3.	Caracterização dos fluidos	73
5.	Resultados e Discussão.....	75
5.1.	Algoritmo para a simulação da migração de LNAPL na zona não saturada.	75
5.2.	Comparação e verificação do algoritmo proposto com o <i>software</i> HSSM.....	80
5.3.	Análise de sensibilidade.....	89
5.4.	Estudo de caso.....	92
5.4.1.	Parâmetros físicos da zona não saturada.....	92
5.4.2.	Simulação dos cenários de migração de LNAPL com o <i>software</i> HSSM e algoritmo	96
5.4.3.	Aplicação do algoritmo proposto para o gerenciamento de planos de ações emergenciais.	113
6.	Conclusão	117
7.	Recomendações	119
8.	Referência Bibliográfica.....	121

1. Introdução

O isolamento de equipamentos elétricos de potência, utilizados em subestações de energia elétrica, é feito por meio da combinação de papel celulose e óleo mineral isolante (OMI). Este último, pode ser naftênico ou parafínico, oriundos da refinação do petróleo e formados por hidrocarbonetos saturados de cadeia fechada contendo entre 15 a 50 átomos de carbono (FRIEDENBERG e SANTANA, 2014; PETROBRAS, 2015; UETA *et al.*, 2012). Os óleos minerais apresentam densidade menor que da água e, em cenários de derramamento, são denominados fase livre ou *light non aqueous-phase liquid* (LNAPL), por serem imiscíveis e menos densos que a água (NEWELL *et al.*, 1992, CORSEUIL, AMORIM JÚNIOR e COELHO, 2011). Em relação à toxicidade, o produto é nocivo quando inalado, e no tocante ao meio ambiente, os óleos minerais isolantes são persistentes, além de apresentar um alto potencial bioacumulativo. Outra característica dessa substância, mas não menos importante, é que ao ser liberada em grandes quantidades em ambientes aquáticos, o óleo mineral isolante pode acarretar na redução do oxigênio dissolvido (PETROBRAS, 2015).

Apesar da restrição de informações sobre acidentes com a liberação de OMI em subestações, em 2014 foram identificados nove sinistros de vazamento em empresas da Eletrobras, totalizando mais de 15 mil litros de óleo isolante derramado (ELETROBRAS, 2014). Em Florianópolis, SC, um único acidente em 2012, resultou na liberação de aproximadamente 12 mil litros de óleo isolante no meio ambiente, causando impactos significativos ao meio ambiente (G1, 2012). Com o objetivo de evitar a contaminação por óleo mineral isolante proveniente dos transformadores das subestações de energia elétrica, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) propõe que seja realizado um plano de contingência para os transformadores. Ainda, a ABNT NBR 13.231, determina que apenas equipamentos que possuem volume de líquido superior a 2.500 litros por equipamento ou um volume total 5.000 litros por subestação são obrigados a dispor do sistema de contenção de líquido isolante. Desta forma, os equipamentos elétricos de potência podem ser considerados fontes potenciais de contaminação dos solos, podendo resultar em impactos à saúde humana e ao meio ambiente.

A fim de evitar impactos ao meio ambiente e à saúde, os modelos matemáticos para a simulação de cenários de derramamentos de óleo mineral isolante são de fundamental importância para o dimensionamento de planos de contingenciamento ambiental e planos de ações emergenciais. Entre diversas formulações matemáticas empregadas no trans-

porte de substâncias nas zonas não saturadas, desponta a equação de Richards, não-linear, com as soluções numéricas bastante complexas e envolvendo diversas técnicas de resolução, tais como o método das diferenças finitas, método de elementos finitos, método dos volumes finitos e transformada de Laplace (CELIA, BOULOUTAS e ZARBA, 1990; LIBARDI, 2005; PIZARRO, 2009; WENDLAND e PIZZARRO, 2010). Assim, uma das formas de contornar os modelos numéricos para a solução de Richards é a utilização de equações modificadas de infiltração, como a de Green-Ampt (HSU e HILPERT, 2011; PELLICHERO *et al.*, 2012; REIBLE *et al.*, 1990; WEAVER, CHARBENEAU e LIEN, 1994). Dentre os *softwares* que utilizam a equação de Green-Ampt (1911), um dos mais utilizados para a simulação de derramamento de LNAPL é o *Hydrocarbon Spill Screening Model* (HSSM), desenvolvido pela U.S.E.P.A. O modelo simula o transporte de hidrocarbonetos na zona não saturada, por meio da equação de Green-Ampt (1911), integrando as propriedades dos fluidos com as propriedades do meio poroso por meio de equações, como por exemplo, de Van Genuchten (1980), Brooks; Corey (1964), Burdine (1953) e Nutting (1934) (WEAVER; CHARBENEAU; LIEN, 1994). No entanto, a equação proposta por Nutting (1934), para a determinação da condutividade hidráulica ao óleo (K_{so}), não apresenta bons resultados quando utilizada em solos argilosos, uma vez que esse tipo de solo possui cargas elétricas na superfície do mineral, resultando em uma interação entre o solo e os fluidos (CORSEUIL, AMORIM JÚNIOR e COELHO, 2011). Em solos com a presença de argilominerais, a condutividade hidráulica ao óleo está diretamente relacionada com as propriedades do fluido e do meio poroso, destacando-se a constante dielétrica, a qual interfere na adsorção do fluido pelo solo. Quanto maior a constante dielétrica maior a espessura do filme adsorvido na superfície das argilas; a título de exemplo, a água apresenta constante dielétrica equivalente a 80, enquanto a do óleo mineral isolante é igual a 2,2, e, em termos práticos, significa que o solo prefere adsorver a água ao óleo mineral isolante (AMORIM JÚNIOR, 2007; CARDOSO, 2011; CORSEUIL; AMORIM JÚNIOR; COELHO, 2011; MACHADO *et al.*, 2016; OLIVEIRA, 2001).

Considerando que parte das subestações elétricas do Brasil foram construídas sobre aterro de solos argilosos, para o cálculo da condutividade hidráulica ao óleo, as simulações obtidas pelo modelo HSSM e *softwares* que utilizam a equação de Nutting (1934) tornam-se imprecisas. À vista disso, o estudo tem como finalidade o desenvolvimento de um novo algoritmo para a modelagem matemática de vazamentos de óleos minerais isolantes em subestações de energia elétrica, consideran-

do a influência dos solos argilosos na migração vertical do óleo mineral isolante em fase livre.

2. Objetivos

2.1. Objetivo Geral

Desenvolver um algoritmo para a simulação do transporte de óleo mineral isolante na zona não saturada incorporando a influência da constante dielétrica do fluido em solos argilosos.

2.2. Objetivos específicos

- a) Acoplar as formulações matemáticas de infiltração de LNAPL – equação de Green-Ampt (1911) -, com a de condutividade hidráulica do meio poroso ao LNAPL - equação de Machado *et al.* (2016).
- b) Verificar o algoritmo proposto e comparar com os resultados obtidos com o *software* HSSM.
- c) Realizar análise de sensibilidade do algoritmo proposto.
- d) Realizar simulações de cenários de derramamento de óleo mineral isolante em dezessete subestações de energia elétrica.

3. Revisão bibliográfica

A energia elétrica brasileira, comumente gerada em locais afastados dos consumidores, é transportada via linhas de transmissão para as subestações de transformação, redes de distribuição, subestação de distribuição, até chegar aos transformadores, localizados nos postes de luzes, e assim, ser transmitida para os centros urbanos, municípios, e indústrias (ABRADEE, 2017 e ELETROBRAS, 2017).

Figura 3.1. Processo de distribuição brasileira de energia elétrica.



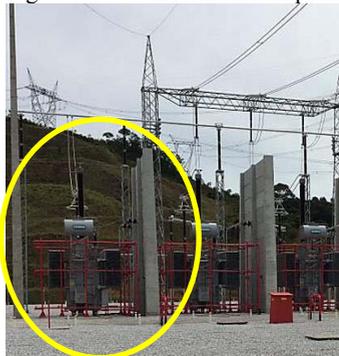
Fonte: Adaptado de Eletrobras (2017).

Tanto as subestações de transmissão como as de distribuição são dotadas de transformadores de potência (Figura 3.3) e de corrente (Figura 3.2), sendo que esses são responsáveis por manter a corrente constante, garantindo a proteção e a medição (ABNT, 2015a), enquanto aqueles são responsáveis por alterar a tensão elétrica (BECHARA, 2010).

Figura 3.2. Transformador de instrumento.



Figura 3.3. Transformador de potência.



Fonte: Elaborado pela Autora.

Os transformadores apresentam como isolante elétrico a combinação de papel celulose com óleo mineral isolante, os quais possuem como função a minimização do fluxo de corrente entre os condutores submetidos a diferenças de potenciais elétricos. Cada transformador apresenta um determinado volume de óleo mineral isolante em seu inte-

rior, sendo que o volume de óleo mineral isolante nos transformadores de corrente, geralmente é de 2,5 mil litros, enquanto nos transformadores de potência o volume pode chegar até 80 mil litros. Ainda, cada transformador apresenta uma determinada isolação elétrica, condizente com a temperatura de operação e máxima tensão de trabalho e de impulso suportável (ZIRBES, ROLIM e ZÜRN, 2005).

No Brasil, as falhas em transformadores, de potência ou de corrente, nas subestações elétricas e nas linhas de transmissão são corriqueiras. Bechara (2010) estudou as possíveis origens das falhas e dos defeitos dos transformadores, e os classificou de acordo com as suas origens: deterioração dos materiais isolantes, deformação mecânica dos enrolamentos por esforços de curto circuito, sobretensões, falhas de acessórios e componentes, comutadores, buchas, conexões e manutenção inadequada. Ainda, o Relatório de Análise - Desligamentos Forçados do Sistema de Transmissão - ANEEL 2016 identificou 42 perturbações em transformadores (Anexo 1), dos quais três resultaram em explosões nas subestações elétricas e seis explosões em linhas de transmissão.

3.1. Caracterização dos óleos minerais isolantes

A isolação elétrica nos transformadores, potencial ou corrente, utilizados nas subestações ocorre por meio do papel celulose e do óleo isolante, vegetal ou mineral. Uma das principais funções do óleo é a refrigeração e o isolamento dos circuitos elétricos, além da capacidade de preservar a parte interna dos transformadores e de prevenir o contato do papel celulose com o oxigênio - evitando a oxidação e, consequentemente, aumentando o tempo de vida da isolação (MARTINS, 2010, REHMAN *et al.*, 2016, SILVA *et al.*, 2012). Entre os possíveis óleos isolantes, destaca-se a preferência pelo óleo mineral isolante devido ao seu baixo custo e as suas ótimas propriedades dielétricas e refrigerantes (SILVA *et al.*, 2012). O óleo mineral é proveniente do refino de uma parte dos hidrocarbonetos de petróleo durante a sua destilação, sendo considerado resíduo perigoso, uma vez que pode conter compostos sulfúricos e nitrogenados (KOHTOH *et al.*, 2010, ZIRBES; ROLIM; ZÜRN, 2005, ABNT NBR 10576:2017).

De acordo com a ASTM (2001), o óleo mineral pode ser diferenciado em tipo I e tipo II. A principal diferença entre eles é a adição de um inibidor de oxidação no óleo mineral tipo II. A Agência Nacional de Petróleo (ANP), por meio da resolução nº 36 de 2007, classifica os óleos minerais isolantes em tipo A e B, este produzido pela base parafínica e aquele pela base naftênico (ANP, 2007). Por sua vez, ASTM (2001)

específica as propriedades necessárias à caracterização do óleo mineral como isolante: tensão interfacial, ponto de fulgor, ponto de fluidez, densidade, entre outras propriedades físico-químicas do óleo, como sumarizadas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1. Propriedade do óleo mineral isolante de transformadores.

Propriedade	Tipo I /II
Tensão interfacial	40
Ponto de fulgor (°C), mínimo.	145
Densidade relativa (15°C)	0,91
Viscosidade máxima	
100°C	3.0
40°C	12.0
0°C	76.0
Constante dielétrica (25°C)	2,2 a 2,3
Conteúdo de PCB	Não detectável

Fonte: Adaptado de ASTM (2001).

Em relação ao meio ambiente, um dos principais problemas ligados ao óleo mineral isolante é a baixa degradabilidade, com uma taxa de apenas 2 a 4% em 28 dias, além do potencial bioacumulativo em organismos aquáticos (PETROBRAS, 2015). Na hipótese de grande quantidade de óleo mineral isolante entrar em contato com o ambiente aquático, o produto pode causar uma redução na disponibilidade de oxigênio desses ambientes, ocasionando sufocamento de animais marinhos (PETROBRAS, 2015). Ademais, o óleo mineral isolante pode proporcionar incêndio em subestações devido ao ponto de fulgor não ser tão elevado (ABNT, 2015b).

Alternativamente aos óleos minerais isolantes, existe no mercado os óleos de éster natural (vegetal), éster sintético e o óleo de silicone (RAJAB, SULAEMAN e SUDIRHAM, 2011 e REHMAN *et al.*, 2016). Dentre esses óleos, tanto o éster sintético quanto o natural são os únicos totalmente biodegradáveis, sendo que o natural ainda é livre de materiais tóxicos (RAJAB, SULAEMAN e SUDIRHAM, 2011 e REHMAN *et al.*, 2016). Outra característica favorável a esses fluidos alternativos é o ponto de fulgor e de combustão elevado, quando comparado com o óleo mineral; para o éster natural, éster sintético e o silicone, esse valor corresponde à 343°C, 275°C e 300°C, respectivamente (ABNT, 2015b). Para que o óleo vegetal seja considerado isolante ele deve possuir características básicas como rigidez dielétrica, condutividade térmica, calor específico e viscosidades adequadas às tensões elétricas (ABNT, 2017). Quando o óleo vegetal é exposto a altas taxas de oxigênio, a oxidação

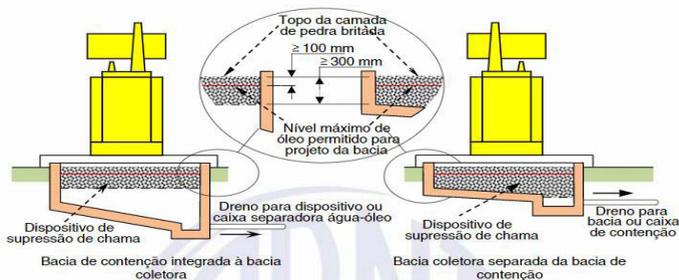
pode reduzir a sua viscosidade tornando-o ineficiente no resfriamento do equipamento e, portanto, não sendo recomendado a sua utilização em transformadores (ABNT, 2017).

3.2. Legislação e normas preventivas acerca das subestações elétricas

Os transformadores de potência ou de corrente, presentes em subestações elétricas, além de aumentar os riscos de incêndios, também podem ser considerados passivos ambientais, por possuírem óleos minerais isolantes em seu interior. Em caso de sinistro, o óleo pode entrar em contato com o solo e águas subterrâneas e superficiais, contaminando-as. Com o objetivo de aprofundar o estudo, apresentar-se-á neste tópico a legislação existente acerca dos transformadores em caso de derramamento.

Para o controle de derramamento de óleo em subestações, a NBR ABNT 13231:2015 propõe a instalação de sistemas de contenção de líquido, que propicia a redução da altura da chama e fluxo de calor radiante, trazendo benefícios tanto para o meio ambiente como para contenção de incêndio. A norma vai além, e determina também que apenas os equipamentos com volume igual ou maior que 2.500 litros devem dispor de uma contenção, ou quando o volume total do líquido na subestação for maior que 5.000 litros.

Figura 3.4. Sistema de proteção contra incêndio (bacias coletoras).



FONTE: ABNT (2015b).

A ANEEL em seu manual de transmissão de 2004, orienta que subestações apresentem plano de contingência para transformadores de potência e reatores (ANEEL, 2004). Além disso, o Brasil possui a Política Nacional do Meio Ambiente, lei nº 6.938, a qual deve ser cumprida tanto pelas empresas privadas como pelas públicas. Essa política deter-

mina a preservação e a restauração dos recursos ambientais, além de obrigar o poluidor a recuperar e pagar pelos danos causados aos recursos ambientais. Entretanto, não existe nenhuma legislação nacional específica acerca de derramamento de óleos isolantes dos transformadores, exceto pela implementação de bacias de contenções.

Em contrapartida, encontram-se recomendações internacionais sobre o controle e medidas necessárias em caso de derramamento de óleo. Destaca-se o *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE) que elaborou um guia para a contenção e o controle de vazamento de óleo de transformadores, livres de PCB, em subestações. O guia apresenta ações, desde as possíveis fontes de contaminação até as medidas de contenção, controle e responsabilidade do derramamento. Os sistemas de controle apresentam como variáveis o volume, o tipo de solo, o tempo de resposta e a idade do óleo, sendo necessário avaliar, separadamente, cada equipamento, para que se consiga estabelecer um plano de contingência adequado.

3.3. Processos físicos do transporte de *light non aqueous phase liquid* (LNAPL) nos solos argilosos

As substâncias líquidas, tais como hidrocarbonetos de petróleo, podem ser denominados *non aqueous phase liquid* quando o líquido e a água possuem propriedades físicas e químicas diferentes, tornando difícil a mistura entre esses dois compostos. Dentro dessa classificação, existem o *dense non aqueous phase liquid* (DNAPL) e *light non aqueous phase liquid* (LNAPL), sendo que a diferença entre esses é o valor da densidade (NEWELL *et al.*, 1992). O óleo mineral isolante e o óleo diesel são exemplos de *light non aqueous phase liquid* (LNAPL), pois apresentam densidade menor que a da água.

O transporte de LNAPL no solo é controlado pela vaporização de hidrocarboneto, dissolução, franja capilar e nível do lençol freático (NEWELL *et al.*, 1992). A franja capilar é definida como a fase de transição entre a zona não-saturada e a zona saturada (BEAR e CHENG, 2010). De acordo com o que é apresentado por Bear e Cheng (2010), a altura da franja capilar pode ser determinado pela equação de Polubari-nova-Kochina (1951,1962), definida a seguir:

$$h_c = \frac{0,45}{d_{10}} \left(\frac{1 - \eta}{\eta} \right) \quad (1)$$

em que h_c é a altura da franja capilar, d_{10} é o diâmetro efetivo da partícula, e η é a porosidade. Ainda, na Tabela 3.2 são apresentados os resultados do estudo realizado por Lohman (1972), que determinou a altura da franja capilar, após 72 dias de análise, para diferentes tamanhos de partículas.

Tabela 3.2. Altura da franja capilar em amostras de solo com diferentes tamanhos de partículas após 72 dias de análises.

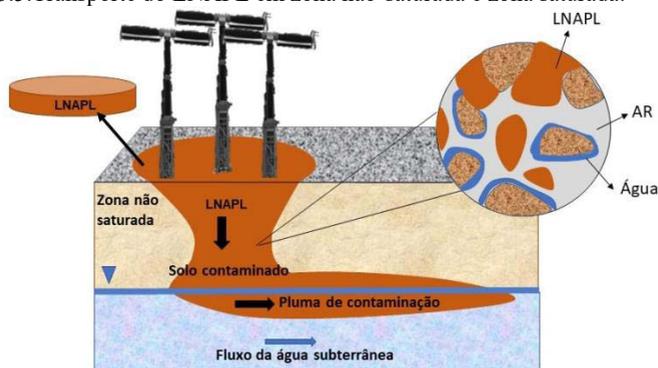
Fração granulométrica	Tamanho das partículas (mm)	Altura da franja capilar (cm)
Cascalho	2-5	2,5
Areia muito grossa	1-2	6,5
Areia Grossa	0,5-1	13,5
Areia média	0,2-0,5	24,6
Areia fina	0,1-0,2	42,8
Silte	0,002-0,05	105,5
Argila	< 0,002	200

Fonte: Adaptado de Bear e Cheng (2010).

O modelo conceitual do transporte do contaminante engloba a zona não saturada e a saturada (Figura 3.5): naquela, a principal força de migração vertical é a gravidade determinada, principalmente, pela carga de LNAPL, ou seja, a altura do LNAPL percolado. Quando há contaminação por LNAPL, uma fração do composto pode se volatilizar e outra pode ficar retida pelas forças capilares, classificando-se como produto residual, e o restante pode migrar até o movimento de massa cessar ou até encontrar as franjas capilares na interface com a água subterrânea, com possibilidade de causar um grande impacto no aquífero. O composto, ao encontrar as franjas capilares, distribui-se entre os poros ocupados pelo ar e água, e quando há compostos solúveis forma-se uma pluma de contaminantes dissolvidos na água subterrânea (AMORIM JÚNIOR, 2007, LOS ANGELES LNAPL WORKING GROUPE, 2011, NEWELL *et al.*, 1992 e TOMLINSON *et al.*, 2017).

Na zona não saturada, o contaminante pode ocorrer isoladamente ou estar particionado com a fase gasosa, sólida ou com a água (Figura 3.5). Para o completo entendimento do transporte e da distribuição dos fluidos na zona não saturada de um determinado tipo de solo é necessário entender as propriedades do líquido percolante e do solo, bem como as possíveis interações entre esses.

Figura 3.5. Transporte do LNAPL em zona não-saturada e zona saturada.



Fonte: Adaptado de Newell *et al.* (1992) e Bedient, Rifai e Newell (1994).

3.3.1. Propriedades dos fluidos e suas implicações na infiltração na zona não saturada.

As propriedades dos fluidos são de fundamental importância no processo de modelagem matemática do transporte de contaminantes no solo. Ao comparar o óleo mineral isolante – fluido de estudo – com a água, aquele apresenta densidade menor (Tabela 3.3), indicando que ao alcançar a água, permanecerá sobrenadante e, portanto, classificado como LNAPL (Figura 3.5). Ainda na comparação, a viscosidade cinemática e dinâmica do óleo mineral isolante também é maior. A viscosidade dinâmica representa a resistência do fluido ao arraste, expressa como massa por comprimento e por tempo. Enquanto a viscosidade cinemática é a relação da densidade com a viscosidade dinâmica representando o fluxo dos fluidos. Ainda, a partir do inverso da viscosidade cinemática, é possível determinar a mobilidade, sendo que ao comparar o óleo mineral isolante com a água, aquele apresenta menor mobilidade do que essa, quando não considerado a interação solo/fluido (CORSEUIL, AMORIM JÚNIOR e COELHO, 2011 e NEWELL *et al.*, 1992).

Na dissertação, a água é o fluido com a maior tensão superficial (72,8 dyna/cm), que é definido como a tensão entre o fluido e o seu vapor saturante (Tabela 3.3). Por sua vez, o óleo mineral isolante possui uma tensão superficial equivalente a 31,2 dyna/cm. Assim, percebe-se que a água apresenta uma tendência maior a se espalhar pelo meio poroso que o óleo, uma vez que os fluidos com tensões superficiais altas exercem maior força no processo de espalhamento do líquido no solo, aumentando a saturação residual (CORSEUIL, AMORIM JÚNIOR e COELHO, 2011).

Em relação a tensão interfacial do óleo mineral isolante com a água, essa corresponde à 40 dyna/cm, sendo que quanto maior a tensão interfacial, maior é a estabilidade entre as interfaces do fluido (NEWELL *et al.*, 1992). Salienta-se, que a tensão interfacial é um importante fator relacionado à molhabilidade, tendência de um fluido de se espalhar e de se aderir a uma superfície sólida na presença de outro líquido imiscível (ASTM, 2001). O conceito molhabilidade é definido com a base do ângulo de contato (β), entre o líquido mais denso e a superfície com o qual se encontra (Figura 3.6), sendo que β menor que 90° corresponde a um fluido molhante, e β maior que 90° considera-se fluido não molhante. O fluido molhante exerce uma pressão sobre o não molhante, fazendo com que esse migre, para que aquele possa ocupar os espaços nos poros (BEAR e CHENG, 2010).

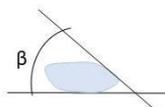
A capilaridade está relacionada com os parâmetros de tensão interfacial e molhabilidade a qual, em um sistema formado por mais de um fluido, define a habilidade do fluido em migrar na zona não saturada influenciando na magnitude da fase residual. A capilaridade ocorre quando se deixa de trabalhar com superfícies planas e assume o trabalho com o fluido penetrando em espaços capilares, que são formados pelas pequenas dimensões dos poros nos solos. Nesses tubos capilares, os fluidos formam meniscos, com a presença do ângulo de contato (β), e, conseqüentemente, podem ser denominados molhantes ou não molhantes (CARDOSO, 2011; CORSEUIL, AMORIM JÚNIOR e COELHO, 2011). A Figura 3.7 apresenta o conceito de molhabilidade aplicado em tubos capilares, para o sistema água e ar, bem como água e LNAPL, em que a água é o fluido molhante, enquanto o ar e o LNAPL são os não molhantes. Ressalta-se, que o fluido molhante desloca o não molhante e, por capilaridade, o fluido se espalha no meio poroso.

Tabela 3.3. Densidade, viscosidade cinética, viscosidade dinâmica e mobilidade dos fluidos em estudo, a 20°C.

Propriedade	Óleo mineral isolante	Água
Densidade (ρ) (g/cm ³)	0,88 ¹	1,00 ²
Viscosidade cinemática (ν) cSt (mm ² /s)	25,00 ¹	0,81 ²
Viscosidade dinâmica (μ) (cP)	22,11 ¹	0,81 ²
Mobilidade (1/ ν)	0,04	1,23
Tensão superficial (σ) (dyna/cm)	31,2 ³	72,8 ²
Constante dielétrica	2,2 ¹	80 ²

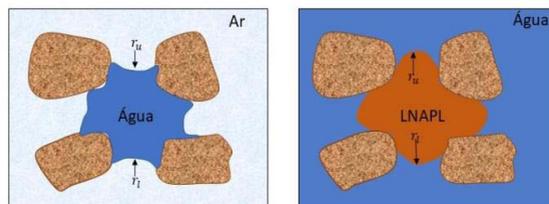
Fonte: (1) PETROBRAS (2015); (2) OLIVEIRA (2001); (3) ELETROSUL (2018).

Figura 3.6. Ângulo de contato (β) do fluido em tubos capilares.



Fonte: Adaptado de Bear e Cheng (2010)

Figura 3.7. Raio de curvatura dos fluidos com o meio poroso



Fonte: Adaptado de Bear e Cheng (2010).

A diferença de pressão entre as fases molhante e não molhante é denominada pressão capilar (P_c), representada matematicamente pela altura da coluna de água. Configura-se assim, a tendência do meio poroso em atrair o percolante, no entanto, para que ocorra a infiltração no meio poroso deve existir uma pressão mínima conhecida com a pressão de entrada (ψ_{ao}). Salienta-se que o fluido molhante tende a penetrar nos menores poros, visto que essa situação corresponde à uma maior pressão capilar (CORSEUIL, AMORIM JÚNIOR e COELHO, 2011; NEWELL *et al.*, 1992).

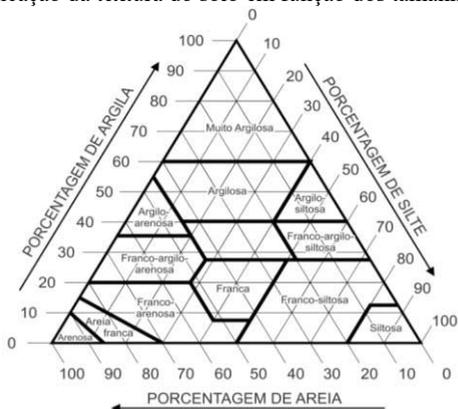
A capilaridade e a adsorção são umas das principais formas de retenção de líquido. Na adsorção, o fluido se liga as partículas de solo por meio de ligações de hidrogênio, hidratação de íons, atração por osmose

e atração dipolar. Esse fenômeno, ocorre em função da polaridade do fluido, que está relacionada diretamente com a constante dielétrica (ϵ), à medida que aumenta a constante dielétrica, então mais polar será o fluido. Para o caso da atração dipolar, destaca-se os meios porosos argilosos que apresentam partículas com grande superfície específica, e com alta capacidade catiônica. A depender do argilomineral presente, as partículas do solo tendem a adsorver mais os líquidos polares (CORSEUIL; AMORIM JÚNIOR; COELHO, 2011). A Tabela 3.3 apresenta a constante dielétrica dos fluidos, e dentre essas, a água é o fluido que apresenta o maior valor, caracterizando-se como um líquido polar, enquanto o óleo mineral isolante, de menor constante dielétrica, é um líquido apolar. Assim, em um cenário de infiltração de água e óleo mineral isolante em meio-poroso argiloso com a presença de argilominerais expansivos, a partícula argilosa teria preferência pela adsorção da água, ao invés do óleo mineral isolante.

3.3.2. Caracterização dos meios porosos.

As partículas minerais do solo apresentam diversos tamanhos, podendo ser classificadas em função do diâmetro que essas partículas apresentam (SANTOS *et al.*, 2005). Cada solo apresenta uma classe textural que é definida pela proporção das frações granulométricas areia, silte e argila. O sistema brasileiro de classificação de solo apresenta 12 classes texturais em função das porcentagens de argila, silte e areia, como apresentado na Figura 3.8.

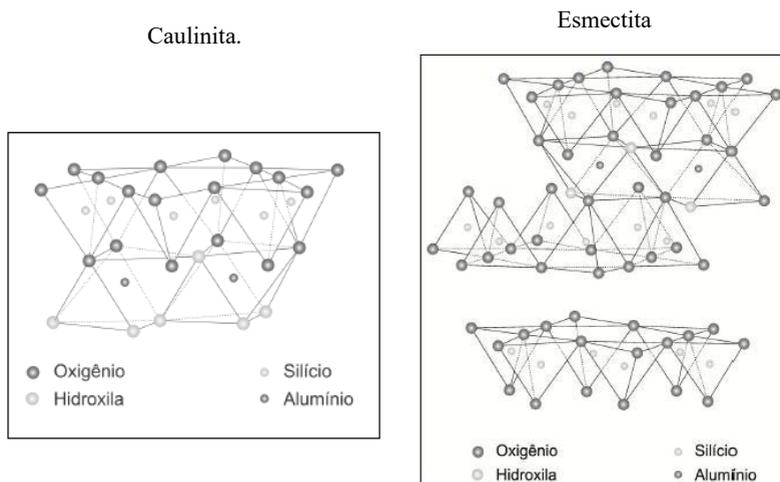
Figura 3.8. Classificação da textura do solo em função dos tamanhos das partículas.



Fonte: SANTOS *et al.*(2005).

Dentre as possíveis granulometrias, as argilas são as que apresentam a maior complexidade mineral, pois além de serem as mais finas, podem ser compostas por um ou mais argilomineral (ITCG, 2017). Os argilominerais possuem em sua composição os silicatos hidratados de alumínio, ferro e magnésio, podendo ser classificadas em: silicatos cristalinos com reticulado em forma de camadas, ou forma lamelar - filossilicatos - ou ainda, silicatos com reticulado de estrutura fibrosa (OLIVEIRA, 2001). Os filossilicatos são os mais abundantes na natureza, apresentando como subgrupos a caulinita, montmorilonita, vermiculita, mica, clorita, entre outras que se diferenciam seja pela distância interplanar basal, seja pela expansibilidade por meio da introdução de moléculas polares basais (OLIVEIRA, 2001). Ademais, os argilominerais filossilicatos podem ser bilaminares ou trilaminares: a diferença é que o primeiro é formado por uma camada tetraédrica e por uma octaédrica (ex.: caulinita, argilomineral 1:1), enquanto os filossilicatos trilaminares são constituídos por uma camada octaédrica e duas tetraédricas (ex.: esmectita, argilomineral 2:1) (OLIVEIRA, 2001). A camada tetraédrica é composta por hidroxilas, átomos de oxigênio e átomos de silício, e a camada octaédrica é constituída pelas hidroxilas, átomos de alumínio e átomos de magnésio (OLIVEIRA, 2001).

Figura 3.9. Estrutura dos argilominerais filossilicatos bilaminares e trilaminares.



Fonte: Adaptado de OLIVEIRA (2001).

A expansividade das argilas varia conforme sua composição, visto que as caulinitas, minerais bilaminares, possuem menor capacidade

de adsorção de água do que a montmorilonita, que são trilaminares (KRAUSKPOF, 1972). Ainda, a expansividade e a retenção de água estão correlacionadas diretamente com a superfície específica das argilas, e, conseqüentemente, relacionadas com a sorção, troca catiônica e a dupla camada de elétrons (OLIVEIRA, 2001). Na dupla camada de elétrons, seu excesso pode ser neutralizado pela adsorção de cátions hidratados da solução, produzindo uma dupla camada iônica (CARDOSO, 2011 e OLIVEIRA, 2001).

Devido à sua polaridade, a água possui uma grande afinidade físico-química com as superfícies dos argilominerais, ocasionando uma expansão nas argilas. Por sua vez, quando o líquido possui afinidade com a argila, ele fica aprisionado no solo, não contribuindo para o fluxo e, conseqüentemente, diminuindo a condutividade hidráulica. O contrário ocorre com os fluidos apolares (ex.: gasolina, óleo diesel e óleo mineral), que apresentam baixa constante dielétrica, resultando, assim, em substâncias de baixa polaridade e de pouca afinidade com a dupla camada de elétrons dos argilominerais, produzindo maiores espaços vazios entre as partículas dos sólidos ocasionando maiores valores de condutividade hidráulica (CARDOSO, 2011). Ressalva-se que essa baixa afinidade do solo argiloso com os fluidos apolares está correlacionada com a redução de tamanho da dupla camada, sendo que quanto menor for essa camada, maior será o espaço disponível para o fluido migrar (MACHADO *et al.*, 2016).

O Índice de Plasticidade (IP) é proporcional a superfície específica dos argilominerais, a capacidade de troca catiônica, e a quantidade de argila (CORSEUIL, AMORIM JÚNIOR e COELHO, 2011). Esse índice está atrelado ao limite de liquidez e ao limite de plasticidade do solo, em que o primeiro é caracterizado como o limite entre o estado plástico e o estado de fluido, enquanto o segundo se caracteriza o limite entre o estado semissólido e o estado plástico (ABNT, 2016). A plasticidade, função do estado plástico, depende da quantidade de argila que o solo possui e do tipo do argilomineral predominante. Logo, quanto maior for o índice de plasticidade, maior será a superfície específica do argilomineral, bem como a capacidade de troca catiônica e a quantidade de argila no solo (CORSEUIL; AMORIM JÚNIOR; COELHO, 2011). Com base no índice de plasticidade, o solo pode ser classificado desde “*não plástico*” até a “*plasticidade muito alta*”, como apresentado por DAS (2011) (Tabela 3.4).

Tabela 3.4. Caracterização dos índices de plasticidade.

IP (%)	Descrição
0	Não plástico
1-5	Ligeiramente plástico
5-10	Plasticidade baixa
10-20	Plasticidade média
20-40	Plasticidade alta
>40	Plasticidade muito alto

Fonte: DAS (2011).

3.3.3. Migração dos fluidos na zona não saturada

O escoamento dos fluidos presentes na zona não saturada é bastante complexo, uma vez que esse processo é determinado principalmente pela ação das forças capilares e pelas características do solo (BENEDIET, 1997). Para modelar o fluxo na zona não saturada é necessário entender as relações saturação e sucção, assim como condutividade e sucção (CORSEUIL, AMORIM JÚNIOR e COELHO, 2011).

3.3.3.1. Relação entre permeabilidade (k), pressão capilar (P) e saturação (S).

O processo de umedecimento/embebição do solo por fluidos imiscíveis (molhante e não molhante), assim como a drenagem/secagem, caracterizados como processo reverso, estão relacionados com a tensão interfacial e molhabilidade, item 3.3.1 e, consequentemente, com a pressão capilar (P_c), ou sucção (BEAR e CHENG, 2010; CARDOSO, 2011). O escoamento do fluido não molhante e imiscível só ocorre após um determinado valor de sucção, conhecido como pressão de entrada de ar (CARDOSO, 2011).

No processo de umedecimento e de drenagem ocorre o fenômeno da histerese, que representa a dependência da sucção com a saturação do solo, resultando em trajetórias diferentes para cada um desses processos, uma vez que o fluido molhante e o não-molhante percorrem caminhos diferentes, no qual o fluido molhante prefere os menores poros, enquanto o fluido não-molhante apresenta a tendência de migrar em poros maiores, em razão da pressão capilar ser menor nessas do que naquelas. Desta forma, o fenômeno da histerese ocorre devido à geometria dos poros, mudanças na estrutura do solo e do ar nos vazios do solo (CARDOSO, 2011). Dessa maneira, esses processos podem ser representados a partir das relações existentes entre sucção/pressão (ψ) e a condutivi-

dade hidráulica do solo (K_s) e entre esse e o conteúdo volumétrico de água (θ), por meio das curvas de retenção (BEDIENT, RIFAI e NEWELL, 1994). Essas curvas variam de acordo com o solo, por exemplo, solos argilosos apresentam maior valor para a sucção, enquanto solos arenosos apresentam menor valor para o mesmo processo.

Ao estudar o derramamento em um sistema trifásico, com um fluido molhante e os outros dois como fluídos não molhantes, deve-se determinar o sentido do fluxo de estudo, e, caso o fluido molhante esteja exercendo uma pressão no não molhante, denomina-se processo de umedecimento, ou caso o fluido não molhante esteja forçando o fluido molhante, corresponde ao processo de drenagem (CORSEUIL, AMORIM JÚNIOR e COELHO, 2011). Alguns dos principais modelos matemáticos utilizados para a determinação da curva de retenção são os modelos de Brooks; Corey (1964) e Van Genuchten (1980).

A equação formulada por Van Genuchten (1980) é apresentada na equação (2):

$$\theta_v = \theta_r + \frac{(\theta_{sat} - \theta_r)}{[1 + |\alpha Pc|^n]^m} \quad (2)$$

em que θ_v é o conteúdo volumétrico, θ_r é o conteúdo volumétrico residual, θ_{sat} é o conteúdo volumétrico de saturação, Pc é a pressão capilar, e α , n e m são constantes empíricas.

Já as equações (3) e (4) apresentam as formulações de Brooks-Corey:

$$\Theta = \frac{S_w - S_{rw}}{1 - S_{rw}}, \Theta = 1 \text{ para } \psi \leq \psi_b \quad (3)$$

$$\Theta = \left(\frac{\psi_{aw}}{Pc} \right)^\lambda, \text{ para } \psi > \psi_b \quad (4)$$

em que Θ é a saturação efetiva, S_w é a saturação de água, S_{rw} é a saturação residual de água, e Pc é a pressão capilar e ψ_{aw} é a pressão de entrada.

Nos modelos de curva de retenção, destaca-se os modelos matemáticos obtidos por Van Genuchten (1980), para os quais foram realizados diversos trabalhos de desenvolvimento de funções de pedotransferência para solos brasileiros, adaptando as equações às características dos solos brasileiros (TOMASELLA e HODNETT, 2004). Segundo o estudo realizado por Hodnett e Tomasella (2002), a partir da granulometria do solo é possível obter os valores médios para os parâmetros da

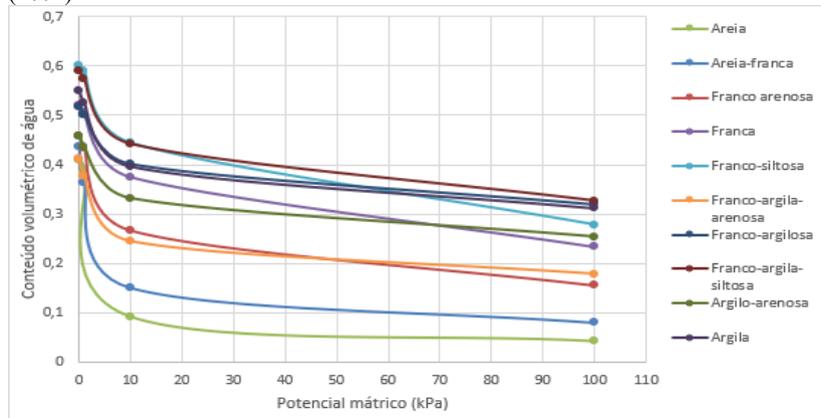
curva de retenção de Van Genutchen em solos tropicais, como apresentado na Tabela 3.5 e na Figura 3.10. Os autores determinaram a média e o desvio padrão dos parâmetros de Van Genutchen por meio da análise de 785 horizontes de 249 perfis de solos tropicais pertencentes a 22 países tropicais disponibilizados na base de dado ISRIC em Wageningen (HODNETT e TOMASELLA, 2002).

Tabela 3.5. Média e desvio padrão dos parâmetros de Van Genutchen para os solos tropicais.

Classe	α (kPa ⁻¹)		n		θ_s (m ³ /m ³)		θ_r (m ³ /m ³)	
	Média	D.P	Média	D.P	Média	D.P	Média	D.P
Areia	0,38	0,15	2,47	0,92	0,41	0,05	0,04	0,02
Areia-franca	0,84	2,71	1,67	0,34	0,44	0,07	0,06	0,06
Franco arenosa	0,40	0,35	1,55	0,29	0,46	0,12	0,14	0,07
Franca	0,25	0,15	1,46	0,29	0,52	0,12	0,15	0,08
Franco-siltosa	0,19	0,14	1,64	0,60	0,60	0,12	0,22	0,12
Franco-argila-arenosa	0,64	0,95	1,54	0,57	0,41	0,07	0,15	0,06
Franco-argilosa	0,39	0,34	1,44	0,19	0,51	0,13	0,27	0,06
Franco-argila-siltosa	0,30	0,31	1,51	0,49	0,59	0,14	0,27	0,12
Argilossiltosa	0,26	0,31	1,47	0,24	0,57	0,12	0,28	0,11
Argilo-arenosa	0,51	0,36	1,40	0,19	0,46	0,07	0,20	0,05
Argila	0,46	0,49	1,5	0,65	0,55	0,08	0,27	0,09

Fonte: Adaptado Hodnett eTomasella, (2002).

Figura 3.10. Curva de retenção obtida a partir dos dados de Hodnett e Tomasella, (2002).



Fonte: Adaptado Hodnett eTomasella, (2002).

A saturação representa a fração dos poros que contém determinado fluido, podendo ser expressa em percentagem da fração ocupada por líquido, e havendo mais de um fluido, cada fluido ocupará uma determinada parcela dos poros (BEAR, 1988 e CARDOSO, 2011). A saturação é definida como a razão entre o volume do fluido (i) e a porosidade da amostra de solo, como apresentado na equação 5 (CORSEUIL, AMORIM JÚNIOR e COELHO, 2011).

Parte do líquido percolado pode estar imobilizado na zona saturada através das forças capilares, fenômeno conhecido como saturação residual que não contribui para o fluxo, uma vez que é de difícil remoção e pode ser influenciada pela distribuição dos tamanhos dos poros, molhabilidade do fluido, tensão interfacial, gradientes hidráulicos e mobilidade (NEWELL *et al.*, 1992). Mercer e Cohen (1990) estudaram a saturação residual de NAPL tanto na zona não-saturada como na saturada e constataram que a porcentagem de saturação residual é maior na zona saturada (15% a 50%) do que na zona não saturada (10% a 20%). A saturação residual da água pode ser determinada por meio da relação dos parâmetros de solo de Van Genuchten, como apresentado na equação 6.

$$S_w = \frac{\theta_v}{\eta} \quad (5)$$

$$S_{rw} = \frac{\theta_s}{\theta_r} \quad (6)$$

No qual θ_v é o conteúdo volumétrico, η é a porosidade, θ_s conteúdo volumétrico saturado e θ_r é conteúdo volumétrico residual.

Não obstante, as equações de Van Genuchten (1980) e de Brooks-Corey (1964) foram formuladas para o sistema ar e água, sendo necessário realizar uma estimativa para as pressões de entrada em sistemas NAPL e ar ($\psi_{(ao)}$), ou NAPL e água ($\psi_{(aw)}$). Uma dessas estimativas é o escalonamento, equação 7, por meio das tensões interfaciais e da densidade (CORSEUIL, AMORIM JÚNIOR e COELHO, 2011 e WEAVER, CHARBENEAU e LIEN, 1994).

$$\frac{\psi_{(ao)}}{\psi_{(aw)}} = \frac{\rho_w \sigma_{ao}}{\rho_o \sigma_{aw}} \quad (7)$$

A sucção efetiva na frente de saturação de NAPL ($\psi_{(eao)}$) é alterada da mesma forma que a pressão de entrada, quando há a movimentação de NAPL ao invés de água, como apresentado pela equação 8,

proposta por Leverett (1941) (CORSEUIL, AMORIM JÚNIOR e COELHO, 2011 e WEAVER, CHARBENEAU e LIEN, 1994).

$$\psi_{(eao)} = \psi_{(ao)} \left(\frac{S_o + S_w - S_{wr}}{1 - S_{wr}} \right)^{-1/\lambda} \quad (8)$$

em que ψ_{eao} é a sucção efetiva na frente de saturação do NAPL, $\psi_{(ao)}$ é a pressão de entrada, S_w é a saturação de água, S_{rw} é a saturação residual de água, λ é o índice e distribuição dos tamanhos dos poros e S_o é a saturação de NAPL.

3.3.3.2. Equações de movimentação do fluido em zona não saturada

O transporte de contaminantes em zona não saturada foi primeiramente obtido por Buckingham, com base na adaptação da equação da zona saturada de Darcy, equação 9 (LIBARDI, 2005). Entretanto, a equação apresentada por Buckingham é válida apenas quando a gravidade pode ser desprezada, já que a equação leva em consideração apenas a condutividade hidráulica à água (K_{sw}) e o potencial mátrico (ϕ_m) em função do conteúdo volumétrico de água no solo (θ_v).

$$q = -K_{sw}(\theta_v) \nabla \phi_m(\theta) \quad (9)$$

Richards em 1928, baseando-se na equação modificada por Buckingham, descreveu o movimento de um fluido na zona não saturada, por meio da equação 10, inserindo o conceito de potencial total definido pela soma do potencial mátrico e do gravitacional ($\nabla\phi$). A equação 10 é conhecida como a equação de Darcy para solos não saturados ou equação de Darcy-Buckingham, válida para situações em equilíbrio dinâmico, caracterizando um fluxo constante com o tempo (LIBARDI, 2005).

$$q = -K_{sw}(\theta_v) \nabla \phi \quad (10)$$

Ao acoplar a equação de Darcy-Buckingham à equação da continuidade, como apresentado na equação 11, é atribuído um caráter transitório para a equação do movimento em solos isotrópico, sendo conhecida como equação de Richards.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[D_z(\theta_v) \frac{\partial \theta_v}{\partial z} \right] + \frac{\partial K_{sw}(\theta_v)}{\partial z} \quad (11)$$

Sendo que D_z é a difusividade na direção vertical-z, θ_v é o conteúdo volumétrico na direção vertical, e K_{sw} é a condutividade hidráulica à água.

Tanto a equação de Darcy para meios saturados como a de Richards apresentam o parâmetro condutividade hidráulica à água (K_{sw}), a qual, segundo Libardi (2005), é definida para um meio isotrópico como o volume de um fluido que atravessa, por unidade de tempo, uma unidade de área de uma amostra de um meio poroso sob um gradiente de potencial total de 1 unidade de força/volume, expressando assim a capacidade de um fluido ser transportado no meio poroso. Bear e Cheng (2010) apresentam a condutividade hidráulica a um fluido (K_{si}) escrita matematicamente de acordo com a equação de Nutting (1934). Ademais, a condutividade hidráulica pode ser determinada tanto matematicamente, equação 12, como por meio de experimentos em campo ou de bancadas. Ressalta-se que para a determinação da condutividade hidráulica a líquidos orgânicos não é indicado em experimentos de campo, já que pode acarretar contaminação do local de estudo.

$$K_{si} = k \frac{\rho g}{\mu} \quad (12)$$

Sendo k a permeabilidade intrínseca, ρ será a densidade do fluido, g a gravidade e μ a viscosidade dinâmica. Para Nutting (1934), parâmetro da permeabilidade intrínseca (k) é definida exclusivamente por meio das propriedades da matriz porosa, caracterizando na capacidade do meio poroso em transmitir o fluido (LIBARDI, 2005; OLIVEIRA, 2001). Entretanto, essa definição de permeabilidade intrínseca não é verificada em meios porosos contendo argila, já que este tipo de solo contém cargas elétricas podendo interagir com o fluido percolante. À medida que há incremento de argila no solo, a interação entre a superfície do solo e a do fluido aumenta, impactando na condutividade hidráulica ao óleo (Machado *et al.*, 2016). Sabe-se que a condutividade hidráulica em solos está relacionada com o tamanho dos grãos, grau de saturação da água, porosidade e constante dielétrica do fluido, sendo que quanto menor a constante dielétrica menor será a adsorção do líquido pelo solo – ver item 3.3.2 - (BUDHU *et al.*, 1991, CARDOSO, 2011, OLIVEIRA, 2001 e MACHADO *et al.*, 2016). O estudo realizado por Oliveira (2001) traz as formulações matemáticas para a determinação da permeabilidade intrínseca, descritas por Bear (1972), Kozeny (1927) Kozeny-Carman (1937).

Budhu *et al.* (1991) estudou o comportamento dos líquidos orgânicos em solos argilosos, constituídos por caulinita e montmorilonita, os quais apresentam maior condutividade hidráulica do que a água em solos argilosos. O autor encontrou a relação entre a razão da condutividade hidráulica água/LNAPL com a constante dielétrica da água/LNAPL, obtendo a seguinte relação matemática (equação 13):

$$\frac{k_o}{k_w} = e^{\lambda(1-\frac{\epsilon_p}{\epsilon_w})} \quad (13)$$

em que λ é uma constante particular do solo que varia de acordo com o dado histórico do estresse aplicado ao solo, ϵ é a constante dielétrica do líquido, k_p é a permeabilidade intrínseca do produto e k_w é a permeabilidade intrínseca da água. Oliveira (2001) também estudou o comportamento de líquidos orgânicos em solos argilosos, em especial os solos compostos por bentonita e caulinita. O autor propôs uma equação para a permeabilidade intrínseca baseando-se nos conceitos introduzidos por Nutting (1934), Bear (1972) e por Kozeny-Carman (1937), sobre a condutividade hidráulica do meio poroso em relação ao óleo e permeabilidade intrínseca ao óleo. O modelo matemático leva em consideração a interação entre o meio poroso e o líquido, como apresentado na equação (14):

$$k = \left(\frac{1}{5}\right) \left[\frac{n^3}{(1-n)^2} \right] \frac{B}{\epsilon^N} \quad (14)$$

em que B é um parâmetro analítico definido estatisticamente, ϵ é a constante dielétrica do líquido, N é correlacionado com o teor de argila por meio dos dados de Scharamm *et al.* (1986) e n é a porosidade do meio. Cardoso (2011) também avaliou o transporte de líquidos orgânicos em solos através da condutividade, levando em consideração a interação solo/líquido. Os resultados obtidos para a condutividade foram correlacionados com o limite de liquidez do solo (LL) e o índice de plasticidade (IP). Por meio dessa correção, Cardoso (2011) formulou uma equação empírica, equação 15, para prever a condutividade hidráulica aos fluidos nos solos:

$$\log\left(\frac{K}{K_{nutting}}\right) = a \times \left(\frac{\epsilon_w}{\epsilon} - 1\right)^b \times \frac{IP^{e+f \times IP}}{c + d \times IP^{e+f \times IP}} \quad (15)$$

em que $a = 0,0035$, $b = 0,1$, $c = 0,005$, $d = 0,001$, $e = 0,42$ e $f = 0,008$, IP é o índice de plasticidade, ε é a constante dielétrica do líquido, ε_w é a constante dielétrica da água, $k_{nutting}$ é a condutividade do óleo obtida por meio de Nutting (1934) sendo a água como líquido de referência.

A partir da equação apresentada acima, equação 15, Machado *et al.* (2016) propôs uma nova equação para determinar a condutividade hidráulica ao óleo a partir da equação de Nutting (1934) e com base nas seguintes propriedades do solo e do fluido: índice de plasticidade, saturação de água, condutividade hidráulica da água, densidade, viscosidade e constante dielétrica da água e do óleo. Para a equação 16, Machado *et al.* (2016) obtiveram um intervalo de confiança de 90%, com um $R^2 = 0,914$.

$$K_{so} = K_{sw} \frac{\rho_f \mu_w}{\rho_w \mu_f} 10^{a \left(\frac{\varepsilon_w - 1}{\varepsilon_o} - 1 \right)^b \left[1 - \exp \left(\frac{-cIP}{c+IP} \log \left(\frac{k_{ref}}{K_w} \right) \right) + \frac{IP}{c+IP} \left(d \log \left(\frac{k_{ref}}{K_w} \right) + \frac{e}{(1-S_w)} \right) \right]} \quad (16)$$

Sendo K_{sw} a condutividade hidráulica à água, ρ a densidade do fluido e da água, μ a viscosidade do fluido e da água, ε a constante dielétrica do fluido e da água e IP o índice de plasticidade. Enquanto os parâmetros a , b , c , d , e e k_{ref} são constantes da equação, equivalendo, respectivamente à 0,263, 0,20, 5,00, 1,19, -0,259 e $1,34 \times 10^{-2}$ cm/s.

Outro conceito fundamental no estudo do escoamento de fluidos orgânicos em sistemas multifásicos é a permeabilidade relativa, já que essa representa a geometria dos poros, molhabilidade, distribuição do fluido, grau de saturação, viscosidade, massa específica, tensão interfacial, e constante dielétrica (CORSEUIL; AMORIM JÚNIOR; COELHO, 2011). Por meio da permeabilidade relativa é possível obter a saturação residual do ar presente na zona não saturada, sendo esse parâmetro de grande importância, pois limita o transporte de LNAPL na zona não saturada. A permeabilidade relativa apresenta uma grande dependência com a saturação, relação conhecida como K-S (CARDOSO, 2011; CORSEUIL; AMORIM JÚNIOR; COELHO, 2011). A relação baseia-se nos dados de saturação e pressão medidos experimentalmente, ou ainda, através de parâmetros de solo, sendo definida por Bear *et al.* (1987) da seguinte maneira:

$$k_{rw} = \frac{K_e(S_w)}{k} \quad (17)$$

Um dos modelos mais utilizados para a obtenção da permeabilidade relativa tanto da água (k_{rw}) quanto do LNAPL (k_{ro}) é o de Burdi-

ne (1953), com as formulações matemáticas apresentadas nas equações de 18 a 22 (CORSEUIL, AMORIM JÚNIOR e COELHO, 2011 e WEAVER e CHARBENEAU, 1994).

$$k_{rw} = \left(\frac{S_w - S_{wr}}{1 - S_{wr}} \right)^e \quad (18)$$

$$k_{ro} = \left(\frac{S_o - S_{or}}{1 - S_{or}} \right)^2 \left[\left(\frac{S_o + S_w - S_{wr}}{1 - S_{wr}} \right)^{\xi - 2} - \left(\frac{S_w - S_{wr}}{1 - S_{wr}} \right)^{\xi - 2} \right], \quad (19)$$

$$S_o > S_{or}$$

$$k_{ro} = 0, S_o < S_{or} \quad (20)$$

$$\xi = \frac{2 + 3\lambda}{\lambda} \quad (21)$$

$$S_{ar} = 1 - S_{wr} - (1 - S_{wr}) \times K_{rw}^{\frac{1}{\xi}} \quad (22)$$

Nas formulações de Burdine (1953), k_{rw} é a permeabilidade relativa da água, k_{ro} é a permeabilidade relativa do óleo, S_w saturação da água, S_{wr} saturação residual da água, S_o saturação do LNAPL, S_{or} saturação residual do LNAPL e λ é o índice de distribuição dos tamanhos dos poros.

3.4. *Softwares* para a modelagem de migração de LNAPL em zona não saturada

Para as simulações do transporte de líquidos orgânicos são utilizados modelos matemáticos que englobam os fenômenos descritos no item 3.3. Desta forma esse tópico tem como objetivo apresentar alguns dos principais modelos matemáticos utilizados na migração do LNAPL em zona não saturada, além de apresentar suas principais vantagens e desvantagens (Tabela 3.6), sendo que o detalhamento dos *softwares* são apresentados nos itens 3.4.1, 3.4.2 e 3.4.3.

Tabela 3.6. Comparação de vantagem e desvantagem dos *softwares* utilizados na migração de LNAPL.

<i>Software</i>	Vantagens	Desvantagens
HSSM (KOPT)	<ul style="list-style-type: none"> • Há quatro opções de cenários de derramamento de LNAPL. • Simulação da infiltração e distribuição do LNAPL em zona não saturada. • <i>Software</i> livre, disponibilizado pela EPA. • Resultados das simulações próximos aos resultados obtidos em estudo de caso com solos arenosos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Não leva em consideração a interação entre o LNAPL e as partículas de solos argilosos. • Não considera o espalhamento horizontal do fluido na superfície.
OILSFM	<ul style="list-style-type: none"> • Considera o espalhamento horizontal do fluido na superfície do solo. • Considera a influência da evaporação do fluido. • <i>Software</i> livre, disponibilizado pela EPA 	<ul style="list-style-type: none"> • Simula apenas a infiltração do LNAPL. • Não leva em consideração a interação entre o LNAPL e as partículas de solos argilosos. • Simula apenas o derramamento na superfície do solo.
MOSES	<ul style="list-style-type: none"> • Considera o processo de evaporação e distribuição horizontal do LNAPL. • Leva em consideração períodos de neve e caso haja incêndio na subestação de energia elétrica. • Simula o derramamento de óleo mineral até atingir corpos hídricos. Para esse cenário considera o processo de advecção, difusão e dispersão. • Simulação da infiltração e distribuição do LNAPL em zona não saturada. 	<ul style="list-style-type: none"> • O <i>Software</i> não é livre, sendo utilizado apenas pela EPRI. • Não leva em consideração a interação entre o LNAPL e as partículas de solos argilosos.

3.4.1. *Hydrocarbon Spill Screening Model* (HSSM)

Os autores Weaver, Charbeneau e Lien (1994) propuseram, como alternativa às formulações numéricas propostas por Darcy-Buckingham

e por Richards, um modelo de infiltração e redistribuição de líquidos imiscíveis (LNAPL) na zona não saturada, utilizando a teoria da onda cinética e da força gravitacional, sendo essa responsável pelo escoamento do fluido.

O modelo idealizado por Weaver, Charbeneau e Lien (1994), *kinematic oily pollutant transport* (KOPT), é uma equação governante de primeira ordem, unidimensional, hiperbólica e quase-linear. O modelo unidimensional apresenta bons resultados quando o escoamento de LNAPL ocorre em grandes áreas, uma vez que se pode negligenciar o escoamento lateral. Ainda, ao se trabalhar com um modelo unidimensional, assume-se um caráter conservativo, uma vez que todo LNAPL se move no sentido do aquífero (WEAVER; CHARBENEAU; LIEN, 1994). As equações de base do modelo são a equação de fluxo de volume (equação 23) e a equação Green – Ampt (1911), para a posição da frente de escoamento (equação 24):

$$q = K_{eo} S_o \left(\frac{H_s - z_f - H_f}{z_f} \right) \quad (23)$$

$$t - t_0 = \eta \frac{S_o}{K_i} \left[z_f - H \ln \left(\frac{z_f + H}{H} \right) \right] \quad (24)$$

sendo que para a equação 23, K_{eo} condutividade efetiva do óleo, S_o a saturação de óleo, H_s é a altura da lâmina de óleo na superfície e H_f é a pressão efetiva na frente de migração. Enquanto para a equação (24), η é a porosidade, K_{ei} é a condutividade efetiva do LNAPL, S_o é a saturação de LNAPL, z_f é a posição do líquido, H é a pressão exercida pelo LNAPL em determinado ponto.

Em conjunto com essas equações, o programa engloba as propriedades dos fluidos com as propriedades do meio poroso por meio de equações, como por exemplo, de Van Genuchten (1980), Brooks; Corey (1964), Burdine (1953) e Nutting (1934), sendo possível assumir quatro condições de contaminação (CHARBENEAU, 1995; WEAVER; CHARBENEAU; LIEN, 1994):

1. Condição de fluxo: caso o fluxo de NAPL seja menor que a condutividade efetiva, todo o NAPL irá infiltrar, e caso o fluxo de NAPL seja maior que a condutividade efetiva, o excesso será considerado como *run-off*.
2. Condição de tratamento: um certo volume é incorporado uniformemente no tempo zero.

3. Condição de lâmina de óleo na superfície constante.
4. Condição de lâmina de óleo constante na superfície por um tempo específico.

Weaver; Charbeneau; Lien (1994) explicam que o modelo proposto por eles apresenta resultados próximos àqueles resultados dos experimentos de campo. Para a validação do modelo, os autores realizaram experimentos de bancada para verificar o tempo de infiltração da lâmina de óleo, bem como a posição da frente de migração do fluido. Ao total foram quatro cenários - A, B, C e D - de derramamento de LNAPL, como detalhado na Tabela 3.7. O experimento foi realizado com Soltrol 220, um LNAPL, que foi derramado em uma coluna de areia de 1 m de comprimento e com 50 cm de diâmetro, originando uma lâmina de óleo de 6,5 cm na superfície do solo. A taxa em que a lâmina de óleo infiltrava era cronometrada, e, ao mesmo tempo a frente de migração do LNAPL era analisada em três diferentes posições: esquerda, centro e a direita da coluna.

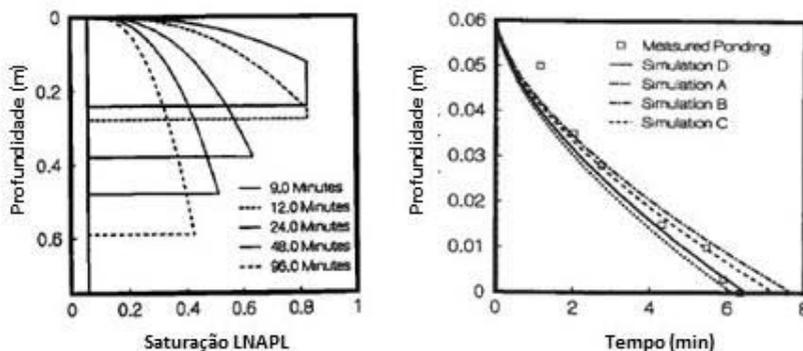
Tabela 3.7. Dados utilizados para a validação do *software* HSSM.

Parâmetros	Cenário de simulação			
	A	B	C	D
K_{sw} (m/d)	78,0	78,0	83,0	78,0
η	0,41	0,41	0,41	0,37
ψ_{aw} (cm)	-24,8	-24,8	-24,8	-24,8
λ	4,84	4,84	4,84	4,84
S_{wr}	0,0588	0,0588	0,0588	0,0588
S_{or}	0,05	0,05	0,05	0,05
μ_o (cP)	4,76	4,76	4,76	4,76
ρ_o (g/cm ³)	0,79	0,79	0,79	0,79
σ_o (dyne/cm)	25,00	25,00	25,00	25,00
k_{rw}	0,5	0,5	0,5	0,5
S_w	0,0588	0,1129	0,1129	0,0588

Fonte: Adaptado de Weaver; Charbeneau (1994).

Ao comparar os resultados obtidos no experimento de bancada com as simulações do HSSM (Figura 3.11), os autores concluíram que as simulações representam bem o comportamento qualitativo da frente de migração. Além de que os autores notaram que a condutividade efetiva exerce uma enorme influência na migração do LNAPL (Tabela 3.8).

Figura 3.11. Validação do modelo matemático HSSM.



Fonte: Adaptado de Weaver e Charbeneau (1994).

Tabela 3.8. Resultados obtidos na validação do HSSM.

Simulação	Tempo final da lâmina de óleo (min)	Condutividade efetiva máxima (K_{eo})	Carga LNAPL ($-H_f$) (m)
A	6,19	5,55	0,1247
B	7,63	4,64	0,1242
C	7,20	4,93	0,1242
D	6,48	5,53	0,1247

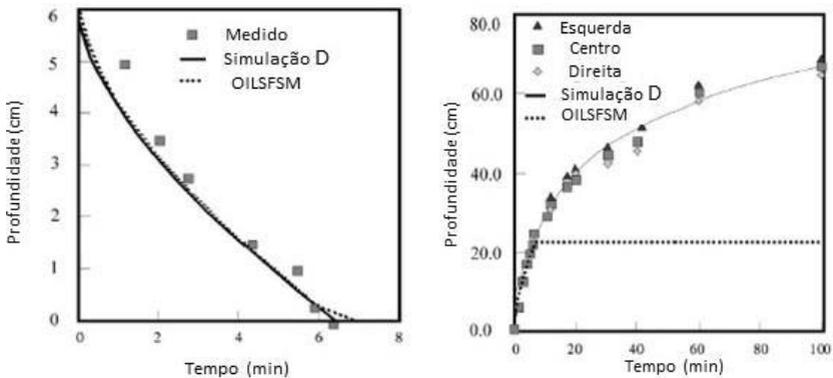
Fonte: Weaver e Charbeneau (1994).

3.4.2. Oil Surface Flow Screening Model – OILSFM.

O *software* OILSFM foi desenvolvido em 2001 por Hussein *et al.* (2001), em parceria com a Agência de Proteção Ambiental Americana - U.S.E.P.A. O OILSFM é um modelo matemático formulado para determinar o fluxo de óleo no solo tanto na vertical quanto na horizontal, considerando a infiltração e a evaporação do fluido. Destaca-se que o processo de infiltração do fluido na zona não saturada é determinado a partir da equação de Green-Ampt (1911) modificada, equação 24, assim como no desenvolvimento do *software* HSSM. O fluxo volumétrico por área de derramamento é determinado pela equação 23, o qual reduz de acordo com o avanço da infiltração na zona não saturada.

Para a validação do modelo, os processos – infiltração, evaporação e a migração horizontal – foram analisados a parte. Para o processo de infiltração de LNAPL, foi utilizado a validação do *software* HSSM, cenário D. A partir dessa comparação, os autores do OILSFM puderam validar e comprovar os resultados de suas simulações, uma vez que essas coincidem com os resultados obtidos pela validação do HSSM.

Figura 3.12. Verificação da equação de Green-Ampt (1911) utilizada no OILSFSM.
 a) Altura da lâmina de óleo b) Infiltração.



Fonte: Adaptado de Hussein *et al.* (2001).

3.4.3. Software: *Mineral Oil Spill Evaluation System* -MOSES

O software *Mineral Oil Spill Evaluation System* -MOSES -, desenvolvido pela *Electric Power Research Institute* (EPRI), tem como principal objetivo simular o comportamento de derramamento de óleo mineral em subestações de energia elétrica, considerando o cenário de derramamento acima da superfície do solo. O software estima a quantidade de óleo que infiltrou na zona não saturada, criando os perfis de saturação para tempos específicos. Assim como o software HSSM, o MOSES é unidimensional, e as equações são baseadas na teoria da onda cinemática e na equação de Richards para o movimento de NAPL. Entretanto, o MOSES não está disponível para o público geral, sendo utilizado apenas pela EPRI.

3.4.4. Outros modelos de infiltração de LNAPL na zona não saturada

A partir da equação de infiltração de Green-Ampt (1911) (equação 24), diversos modelos foram desenvolvidos para as mais diversas especificidades. Por exemplo, Yoon *et al.* (2009) desenvolveu um modelo de infiltração e redistribuição de LNAPL no solo e na água, para cenários de derramamentos de LNAPL em caminhões de tanque de gasolina. Desta forma, Yoon *et al.* (2016) alterou a geometria de contaminação, passando da forma circular para a retangular, adequando-se ao

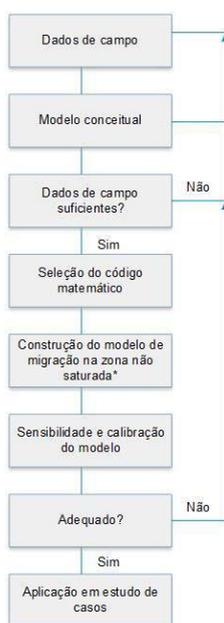
cenário de derramamento de óleo. Neste modelo, também é acrescentado módulos de cálculo para determinar a taxa de evaporação, dissolução de NAPL e o transporte desse na água subterrânea. De acordo com os autores, a alteração da geometria circular para a retangular não altera o processo de infiltração, mas altera o de redistribuição – fenômeno que ocorre após a lâmina de óleo cessar.

Também com base na equação de Green-Ampt (1911), Xu *et al.* (2015) propôs outro modelo de infiltração de LNAPL. Esse modelo matemático utilizou como base as equações do HSSM para a zona vadosa, e acoplou as equações do MT3DMS (*Modular Three-Dimensional Multispecies Transport Model*) para a zona saturada. Assim como no HSSM, os autores consideraram um sistema homogêneo na zona não saturada, em que a contaminação possui uma geometria circular com infiltração vertical em 1-D.

4. Materiais e Métodos

Para o desenvolvimento do algoritmo de previsão de migração de LNAPL na zona não saturada foi utilizado como base o fluxograma apresentado no guia *Application of numerical groundwater flow model to site-specific problem* - desenvolvido pela ASTM D5447-17 (Figura 4.1).

Figura 4.1. Fluxograma para o desenvolvimento do algoritmo de migração de LNAPL na zona não saturada.



*Adaptado para a zona não saturada
 Fonte: Adaptado de ASTM (2017).

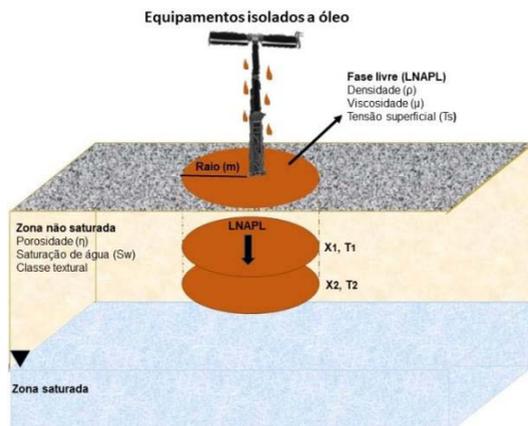
Desta forma, a metodologia é dividida em quatro partes, englobando as seguintes etapas do fluxograma:

1. Desenvolvimento do algoritmo, considerando a definição do modelo conceitual, seleção do código matemático e construção do modelo.

2. Calibração e verificação do algoritmo proposto.
 3. Análise de sensibilidade do algoritmo proposto.
 4. Aplicação do algoritmo proposto em estudos de caso.
- 4.1. Desenvolvimento do algoritmo de infiltração de LNAPL na zona não saturada.

Para o desenvolvimento do algoritmo foi considerado o modelo conceitual apresentado na Figura 4.2. O algoritmo tem como principal objetivo definir a frente de migração do LNAPL na zona não saturada, desconsiderando o fluxo na franja capilar e na zona saturada. Desta forma, considerou-se que a migração do LNAPL ocorre em um sistema trifásico de transporte vertical e unidimensional, sendo que o derramamento tem o formato de uma geometria circular, em que o raio está relacionado com o volume e com a altura da lâmina de óleo gerada na superfície do solo, logo após a contaminação. A lâmina de óleo na superfície do solo decai gradualmente de acordo com as características do solo, resultando em um cenário em que o óleo mineral isolante migre ao fluxo máximo permitido pela condutividade efetiva do solo.

Figura 4.2. Modelo esquemático do escoamento do LNAPL em zona não saturada.



Fonte: Elaborado pela Autora.

A partir dessas premissas, a simulação foi adaptada a partir da formulação matemática proposta por Weaver, Charbeneau e Lien (1994), na qual o fluxo é determinado pela equação 23, e a posição da frente de escoamento é determinada por Green-Ampt (1911), equação

24. O algoritmo proposto tem como estrutura de base o fluxograma apresentado na Figura 4.3 e na Tabela 4.1.

Desta forma, como parâmetro de entrada no algoritmo é necessário caracterizar os fluidos percolantes, por meio das seguintes propriedades: densidade, viscosidade, tensão superficial e constante dielétrica do fluido. Também é necessário caracterizar o meio poroso, por meio das seguintes propriedades: índice de plasticidade, porosidade, textura do solo, condutividade hidráulica saturada à água, saturação residual da água e do óleo. Também como dado de entrada pode-se optar por utilizar a curva de retenção de Van Genuchten (1980) ou de Brooks-Corey (1964), caso utilize-se a primeira curva, o índice de distribuição dos poros (λ) e da pressão de entrada (h_{ce}) serão obtidos por meio da correlação de Lenhard; Parker; Mishra (1989) (equações 25, 26 e 27).

$$\lambda = \frac{m}{1-m} (1 - k_{rw}^{\frac{1}{m}}) \quad (25)$$

$$S = 0.72 - 0.35e^{-n^4} \quad (26)$$

$$h_{ce} = \frac{S(\frac{1}{\lambda})}{\alpha} (S(\frac{1}{m}) - 1) \quad (27)$$

Onde m e n são o parâmetro da curva de retenção de Van Genuchten e k_{rw} é a permeabilidade relativa da água.

Outras opções de entrada são a atribuição do valor de saturação de água e a pressão capilar do solo. Caso não haja informação acerca da saturação de água no solo, o modelo matemático pode calcular a saturação de água, com base na equação 02, de acordo com a pressão capilar. Por meio da saturação de água e da saturação de ar, que é obtida pela equação 22, determina-se a saturação de óleo utilizando a equação 28. Ressalta-se que a saturação de água e de ar são constantes durante todo o perfil de migração, e, desta forma, a saturação de óleo na frente de migração também se torna constante.

$$S_o = 1 - S_w - S_{ar} \quad (28)$$

Em relação a carga exercida pelo LNAPL na frente de migração, essa corresponde a soma da altura da lâmina de óleo na superfície - potencial de pressão - e da pressão capilar no solo. À medida que o óleo infiltra, a altura da lâmina de óleo na superfície reduz, de acordo a equação 29 desenvolvida por Weaver, Charbeneau e Lien (1994).

$$H_s^{n+1} = H_s^n + \eta S_o (z_f^{n+1} - z_f^n) \quad (29)$$

Já a pressão capilar exercida pelo óleo é dividida em duas partes: uma antes da frente de migração, e outra na própria frente de migração. Para o cálculo da pressão depois do movimento utiliza-se a equação 08, a qual é em função da saturação de água, residual de água e a do óleo. Para a pressão capilar exercida na frente de migração utiliza-se a equação 31, que é um desdobramento da equação 30.

$$H_f = \psi_{(eao)} - \frac{K_{so} \psi_{(ao)}}{K_e (1 - S_{rw}) \lambda} \int_0^{S_o} k_{ro} \left(\frac{S_o + S_w - S_{wr}}{1 - S_{wr}} \right)^{-(1+\frac{1}{\lambda})} \quad (30)$$

$$H_f = \psi_{(eao)} - \left(\frac{S_o - S_{or}}{1 - S_{or}} \right)^2 \left[\left(\frac{S_o + S_w - S_{wr}}{1 - S_{wr}} \right)^{\xi-2} - \left(\frac{S_w - S_{wr}}{1 - S_{wr}} \right)^{\xi-2} \right] \left(\frac{S_o + S_w - S_{wr}}{1 - S_{wr}} \right)^{-(1+\frac{1}{\lambda})} \quad (31)$$

Já a condutividade efetiva do LNAPL (equação 33) é determinada pelo produto entre a condutividade hidráulica do meio poroso ao LNAPL (K_{so}) e permeabilidade relativa (k_{ro}), calculada por meio do método de Burdine (1953), apresentada nas equações 18 a 22.

$$K_{eo} = K_{so} k_{ro} \quad (32)$$

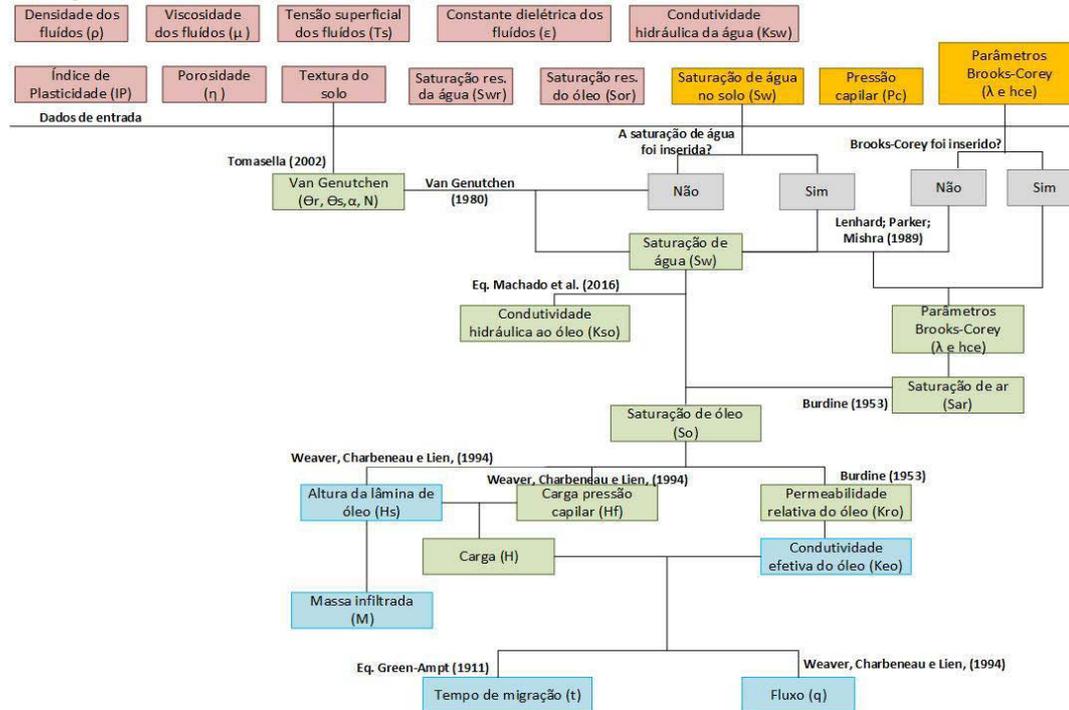
Por sua vez, a condutividade hidráulica ao LNAPL é determinada pela equação de Machado *et al.* (2016), definida pela equação 16. Destaca-se que a utilização dessa equação é de fundamental importância, uma vez que a equação de Nutting (1934) não apresenta bons resultados para solos argilosos, devido ao fato de desconsiderar as interações fluido-solo.

A partir da determinação da condutividade hidráulica ao LNAPL é possível obter o fluxo de escoamento do líquido orgânico, assim como determinar a frente desse escoamento, que tem a metodologia apresentada na Figura 4.3 e Tabela 4.1. Os resultados obtidos resultam em curvas de migração vertical em relação ao tempo e a posição dos óleos minerais isolantes na zona não-saturada do solo, permitindo decisões mais efetivas em ações emergenciais.

Tabela 4.1. Principais equações utilizadas no desenvolvimento do novo algoritmo

Equação de migração de LNAPL na zona não saturada	
Green-Ampt (1911)	$t - t_0 = \eta \frac{S_o}{K_e} \left[z_f - H \ln \left(\frac{z_f + H}{H} \right) \right]$
Van Genuchten (1980)	$\theta_v = \theta_r + \frac{(\theta_{sat} - \theta_r)}{[1 + \alpha \psi_m ^n]^m}$
Brooks-Corey (1964)	$\Theta = \left(\frac{\psi_b}{\psi} \right)^\lambda$
Burdine (1953)	$k_{ro} = \left(\frac{S_o - S_{or}}{1 - S_{or}} \right)^2 \left[\left(\frac{S_o + S_w - S_{wr}}{1 - S_{wr}} \right)^{\xi-2} - \left(\frac{S_w - S_{wr}}{1 - S_{wr}} \right)^{\xi-2} \right]$
Nutting (1934)	$K_{so} = k \frac{\rho_o}{\mu_o}$
Machado <i>et. al.</i> (2016)	$\log \left(\frac{K}{K_{nutting}} \right) = a \times \left(\frac{\varepsilon_w}{\varepsilon} - 1 \right)^b \left[1 - \exp \left[\frac{-cIP}{c+IP} \log \left(\frac{k_{ref}}{K_w} \right) \right] \right. \\ \left. + \frac{IP}{c+IP} \left[d \log \left(\frac{k_{ref}}{K_w} \right) + \frac{e}{1 - S_w} \right] \right]$

Figura 4.3. Fluxograma da metodologia aplicada para a determinação da frente de escoamento. Legenda: Rosa-dados obrigatório; Laranja – dados opcionais; Verde – Parâmetros intermediários; Azul -Parâmetros finais.



Fonte: Elaborado pela Autora

4.2. Comparação e verificação do algoritmo de infiltração de LNAPL com o *software* HSSM

Para a calibração e verificação do algoritmo proposto foi utilizado como base o guia para a calibração de modelos de fluxo de água subterrânea D5981-18, desenvolvido pela ASTM.

De acordo a ASTM (2018), a calibração é um processo de refinamento das propriedades hidrogeológicas, hidráulicas e das condições de contorno, com o objetivo de se obter um grau de correspondência entre o modelo de simulação e os dados observados em campo. Já a verificação, de acordo com a ASTM (2018), é o uso de parâmetros e condições de contornos já calibrados em um modelo, para os quais realiza-se uma aproximação para um segundo dado de campo medido em condições hidrogeológicas similares.

A fim de validar o algoritmo proposto, o guia D5981-18 foi adaptado de acordo com os dados disponíveis na pesquisa. Desta forma, para a averiguação dos resultados obtidos no algoritmo, o cenário de validação do *software* HSSM foi utilizado como base (item 3.4.1), o que tornou possível a comparação entre os resultados obtidos pelo algoritmo proposto e os resultados do *software* HSSM. Esse mesmo procedimento de validação e comparação dos dados foi realizado no *software* OILSFM, desenvolvido por Hussein, Jin e Weaver (2002).

A verificação realizada constitui-se de quatro cenários de derramamento de LNAPL – Soltrol 220 – em solos arenosos, devido à boa correspondência entre os resultados obtidos no HSSM para esse tipo de solo. A diferença entre os cenários está nos seguintes parâmetros: condutividade hidráulica à água (K_{sw}), porosidade (η) e saturação da água (S_w). Esses cenários foram simulados em duas diferentes situações de derramamento de óleo, sendo que para a primeira situação considerou-se que o tempo de permanência do óleo na superfície é zero, ou seja, o óleo é inserido na superfície e ao mesmo tempo já começa infiltrar na zona não saturada. Por sua vez, a segunda situação é aquela em que a lâmina de óleo permanece constante por um determinado tempo na superfície do solo, adotando como parâmetro o valor de 10 segundos (Tabela 3.7 e Tabela 4.2).

A ASTM (2018) define como uma das etapas de calibração o cálculo de resíduos, ou seja, a diferença entre o valor computado e o observado para um tempo e espaço específicos. De acordo com a adaptação, os resultados obtidos por meio do *software* HSSM foram considerados

como os dados observados, e, por conseguinte, a equação utilizada para o cálculo dos resíduos é apresentada na equação 33.

$$residuo = parâmetro_{algoritmo} - parâmetro_{HSSM} \quad (33)$$

Tabela 4.2. Parâmetros de simulação utilizados para a comparação do algoritmo proposto e do *software* HSSM

		Cenários	Parâmetros				
			Lâmina de óleo		Área contaminada		
			Altura (cm)	Tempo na superfície (s)	Área (m ²)	Raio (m)	Volume (L)
SIMULAÇÃO	I	A I	6,5	0	1	0,564	65
		B I					
		C I					
		D I					
	II	A II	6,5	10	1	0,564	65
		B II					
		C II					
		D II					

Fonte: Elaborado pela Autora.

Salienta-se que não foi possível comparar os resultados obtidos no algoritmo com os resultados de experimentos de campo alcançado, por Weaver e Charbeneau (1994), na validação do HSSM, visto que não há um detalhamento tão específico dos resultados, impossibilitando a realização do cálculo dos resíduos.

4.3. Análise de sensibilidade do algoritmo

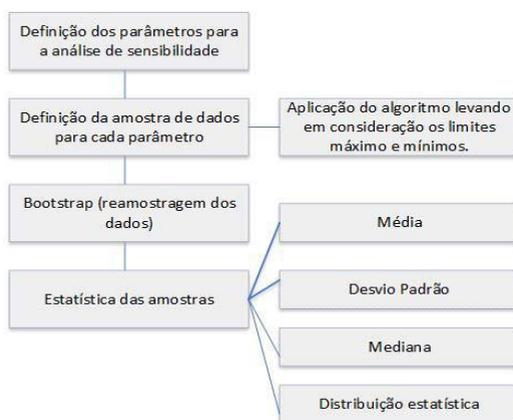
A análise de sensibilidade dos parâmetros do algoritmo tem como finalidade identificar quais variáveis necessitam de maior refinamento, quando consideradas no modelo matemático. A metodologia adotada para a análise de sensibilidade engloba a análise de *bootstrap*, técnica utilizada para a estimativa de intervalo de confiança. Essa análise consiste na reamostragem simples de dados, ou seja, a partir de uma amostra de dados de um determinado parâmetro, gera-se novas amostras com os mesmos dados, levando em consideração a repetição de dados, além de considerar que cada dado possui a mesma probabilidade de ser escolhido (GINEVAN; SPLITSTONE; CRC, 2004; MANLY; CRC, 1944; TRAUTH, 2015). Desta forma, a partir da reamostragem por meio do

bootstrap das amostras de dados é possível determinar a média, o desvio padrão, mediana e a caracterização da distribuição da amostra.

As principais equações do algoritmo, que determinam a frente de escoamento, são a equação de Machado *et al.* (2016) e de Green-Ampt (1911), equação 16 e 24, respectivamente. Desta forma, optou-se por realizar a análise de sensibilidade nos seguintes parâmetros, separadamente: condutividade hidráulica à água (K_{sw}), porosidade (η), índice de plasticidade (IP), saturação de água (S_w), saturação residual de água (S_{rw}), saturação residual de óleo (S_{ro}) e altura da lâmina de óleo na superfície (h_e).

Antes de aplicar o método de *bootstrap* (Figura 4.4), é necessário definir a amostra de dados para cada um dos parâmetros selecionado, e, para isto, considerou-se um cenário no qual os parâmetros variam de acordo com os critérios apresentados na Tabela 4.3. Os limites mínimos e máximos foram estabelecidos de acordo com os possíveis valores que os parâmetros podem assumir, sempre com o esforço de aproximar as simulações da realidade. Quando se pretende realizar a análise de sensibilidade de uma variável, é necessário fixar os valores de base para as demais variáveis. Por exemplo, para a definição da amostra de dados da condutividade hidráulica à água (K_{sw}), que oscila entre os limites de 2×10^{-4} a 5×10^{-5} cm/s, os demais parâmetros são estabelecidos de acordo com a coluna designada como valor de base, constituindo assim um tamanho de amostra de 190 dados.

Figura 4.4. Fluxograma das etapas da análise de sensibilidade.



Fonte: Elaborado pela Autora.

Tabela 4.3. Parâmetros utilizados para a análise de sensibilidade do *bootstrap*

Parâmetro	Limite mínimo	Limite máximo	Valor de base	Intervalo de Variação	Tamanho da amostra
K_w (cm/s)	2×10^{-5}	5×10^{-4}	1×10^{-4}	1×10^{-6}	190
η	0,1	0,9	0,5	0,01	80
IP	10	50	20,00	1	40
S_w	0,11	0,9	0,5	0,01	79
S_{rw}	0,1	0,45	0,25	0,01	35
S_{ro}	0,1	0,45	0,25	0,01	35
h_e (cm)	0,1	100	1	0,1	999

Fonte: Elaborado pela Autora.

Após a definição das amostras de dados para cada um dos parâmetros, optou-se por realizar 100.000 reamostragens por meio do *bootstrap*, sendo que para cada uma foram realizadas as seguintes análises estatísticas: média, desvio padrão, mediana e distribuição da amostra.

4.4. Estudo de caso aplicado ao algoritmo proposto

Com o intuito de comparar os resultados obtidos com o Modelo HSSM e o algoritmo proposto, foram realizadas simulações matemáticas em dezessete subestações de energia elétrica. As áreas selecionadas estão localizadas no sul do Brasil, e possuem solos com as mais diversas características. Para a simulação foi necessária a definição do modelo conceitual, a caracterização do solo, os fluidos percolantes e as condições e premissas adotadas para as simulações, conforme apresentado a seguir.

4.4.1. Modelo conceitual

Para a simulação do derramamento de LNAPL na zona não saturada, considerou-se um vazamento de 2.500 L de óleo mineral isolante em uma área de 250 m². Logo, a altura da lâmina de óleo é de 1 cm, e, após permanecer constante por 10 segundos, a altura começa a diminuir. Outro ponto importante de definição é a altura do lençol freático; como não foi possível obter estimativas para esse dado, assume-se para a altura do lençol freático o equivalente a 5 metros, garantindo assim que não há influência da zona saturada.

Para os estudos de caso foram simulados dois diferentes cenários de derramamento de óleo, os quais são definidos pelas pressões capila-

res: a pressão da capacidade de campo (33kPa) e o ponto de murcha permanente(1500kPa). Para cada uma dessas pressões, o solo apresenta diferentes saturações de água e óleo, como apresentado a seguir:

- Pressão capilar de 33kPa: admite-se que as saturações de água e de LNAPL são bastante similares.
- Pressão capilar de 1500kPa: admite-se que a saturação da água é menor do que a saturação de LNAPL, caracterizando solo predominantemente seco.

4.4.2. Caracterização do solo

Para a utilização do algoritmo é necessário determinar as seguintes propriedades de solo: textura do solo, índice de plasticidade, porosidade, saturação de água, saturação residual de água e de óleo, além da condutividade hidráulica saturada à água. Desta forma, foram realizadas as seguintes análises: granulometria, índice de plasticidade, densidade do solo e de partículas do solo, além dos ensaios de condutividade hidráulica do meio poroso à água, por meio do permeâmetro Guelph.

A textura do solo foi determinada por meio da análise granulométrica, a qual ocorreu de acordo com metodologia do método da pipeta estabelecida pela EMBRAPA (1997). O objetivo da análise foi determinar as frações de areia grossa, fina, silte e argila, uma vez que a partir dessas frações torna-se possível definir a textura do solo por meio do triângulo textural (Figura 3.8), e, conseqüentemente, a saturação residual de água, equação 34, e a saturação de água, equação 35. Em relação a saturação do óleo assumiu-se o valor de 0,1 como descrito no item 3.3.2.

$$S_{wr} = \frac{\theta_r}{\theta_s} \quad (34)$$

$$S_w = \frac{\theta_i}{\eta} \quad (35)$$

O índice de plasticidade (IP) foi determinado por meio da metodologia estabelecida pela ABNT NBR 7180:2016. Esse parâmetro corresponde à determinação do teor de umidade referente a mudança do estado plástico para o estado líquido (ABNT, 2016).

Aa análises de densidade do solo (ρ_a) e da densidade de partículas (ρ_p) foram realizadas de acordo os padrões estabelecidos pela EM-

BRAPA (1997), tornando possível a determinação da porosidade do solo (equação 36).

$$\eta = 1 - (\rho_a - \rho_p) \quad (36)$$

A coleta de solo para a densidade ocorreu por meio do anel volumétrico (Figura 4.5). Em relação à análise granulométrica e ao índice de plasticidade, foram coletadas cerca de 1 kg de solo para cada uma dessas análises. Essas coletas ocorreram a cerca de 15 cm abaixo da superfície, profundidade equivalente ao do ensaio de permeâmetro Guelph.

Figura 4.5. Coletas de campo para as análises de densidade aparente, granulometria e índice de plasticidade. a) Anel volumétrico para a coleta de solo. b) Amostra de solo indeformada, coletada para a análise granulométrica.

a)



b)



Para a determinação da condutividade hidráulica saturada da água no solo foi utilizado o permeâmetro Guelph, modelo 2800K1 da SOIL-MOISTURE EQUIPMENT CORP. O equipamento é um permeâmetro de carga constante que funciona segundo o princípio de Mariotte, com cálculo da condutividade hidráulica obtido segundo a equação 37 (CORP, 2008):

$$K_{sw} = \frac{C_1 Q_1}{2\pi H_1^2 + \pi a^2 C_1 + 2\pi \frac{H_1}{a}} \quad (37)$$

em que C_1 e a são estabelecidos pelo fabricante, Q_1 é a vazão, H_1 é a variação do nível de água e a é o raio do poço.

O permeâmetro Guelph é composto por dois reservatórios graduados, de diferentes diâmetros, por meio dos quais infere-se o nível da água. Em solos argilosos utiliza-se somente um desses reservatórios, já que a condutividade hidráulica à água é menor que em solos arenosos, para os quais são necessários a utilização dos dois reservatórios.

Antes de começar o ensaio pelo permeâmetro Guelph, foi necessário avaliar o local de estudo, dando-se preferência as regiões planas e com solos não muito saturados, como acontece logo após o período de chuvas intensas, tornando-os totalmente saturados. No caso das subestações elétricas, essas possuem camadas superficiais de britas sendo necessário a retirada dessas britas no local que ocorreram os ensaios, como mostra a Figura 4.6.

Figura 4.6. Ensaio com o permeâmetro Guelph.



4.4.3. Caracterização dos fluidos

O estudo considerou, na simulação do algoritmo proposto e no HSSM, os fluidos água e óleo mineral isolantes (OMI), uma vez que esse é o principal fluido de transformadores. Para a simulação do derramamento na zona não saturada é necessário a caracterização dos seguintes parâmetros: densidade, viscosidade dinâmica, viscosidade cinemática, constante dielétrica, mobilidade, tensão interfacial e superficial (Tabela 4.4).

Tabela 4.4. Principais propriedades dos fluidos em estudo.

Fluidos	Óleo Mineral Isolante	Água
---------	-----------------------	------

Propriedade dos Fluidos	Densidade ρ (g/cm ³)	0,8847	0,9982
	Viscosidade cinemática ν (cSt)	25	0,811461
	Viscosidade dinâmica μ (cP)	22,118	0,8100
	Tensão superficial γ (dyna/cm)	48,30	72,8
	Constante dielétrica ϵ	2,2	80
	Mobilidade (ρ/μ)	0,04	1,23
	Tensão interfacial σ (mN/m)	40	-

Fonte: ANP (2007); Oliveira (2001); Petrobras (2015); Wada (2011)

Em relação aos dados apresentados na Tabela 4.4, optou-se por trabalhar com a temperatura ambiente de 20°C. Em tempo: uma vez que a própria ABNT NBR 10576:2017 não determina uma periodicidade para a avaliação dos óleos minerais isolantes, os dados são valores de referência para óleos novos.

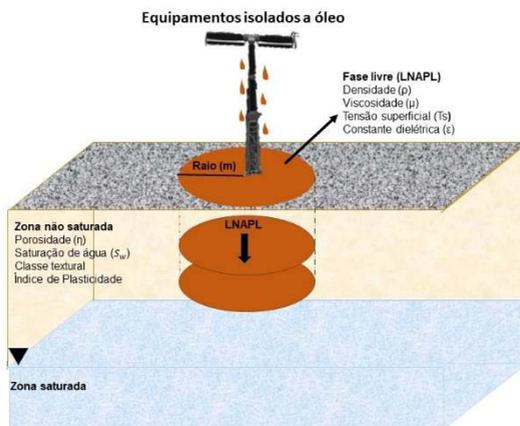
5. Resultados e Discussão

5.1. Algoritmo para a simulação da migração de LNAPL na zona não saturada.

O algoritmo foi desenvolvido na linguagem de programação Python 3.6, utilizando as equações apresentadas no item 3.3.3, e seguindo o modelo conceitual que representa o derramamento na forma circular no meio poroso, como pode ser visto na Figura 5.1. Em suma, o algoritmo proposto apresenta as seguintes características:

- Modelo 1-D.
- Migração vertical de LNAPL.
- Modelo analítico e determinístico.
- Simulação do fenômeno da infiltração.
- Aplicação do conceito de conservação da massa.
- Pondera a influência da argila na migração de LNAPL.
- Considera, na migração do LNAPL, o solo como homogêneo.

Figura 5.1. Modelo conceitual utilizado para a construção do algoritmo.



Fonte: Elaborado pela Autora.

A Tabela 5.1 apresenta detalhadamente os dados de entrada necessários para a simulação, abrangendo a descrição de cada um desses parâmetros e a referência que pode ser utilizada.

Tabela 5.1. Descrição dos dados de entrada do algoritmo.

Caracterização dos fluidos	
Parâmetro	<i>Densidade (ρ_i)</i>
Unidade	g/cm^3
Descrição	As densidades dos fluidos são utilizadas para o cálculo da condutividade hidráulica ao óleo - equação de Machado <i>et al.</i> (2016). Sendo também utilizadas para a definição da pressão de entrada do fluido no solo - equação de Lenhard <i>et al.</i> (1989).
Fonte	FISPQ -Ficha de informação e segurança do produto químico.
Parâmetro	<i>Viscosidade (μ_i)</i>
Unidade	cP
Descrição	As viscosidades dos fluidos são utilizadas para o cálculo da condutividade hidráulica do meio poroso em relação ao óleo.
Fonte	FISPQ -Ficha de informação e segurança do produto químico.
Parâmetro	<i>Tensão superficial (T_{si})</i>
Unidade	dyna/cm
Descrição	As tensões superficiais do fluido são utilizadas para o cálculo da pressão de entrada do óleo.
Fonte	FISPQ -Ficha de informação e segurança do produto químico.
Parâmetro	<i>Constante dielétrica (ϵ_i)</i>
Unidade	-
Descrição	Utilizada para a determinação da condutividade hidráulica ao óleo, com base na equação de Machado <i>et al.</i> (2016).
Fonte	FISPQ -Ficha de informação e segurança do produto químico.
Caracterização do solo	
Parâmetro	<i>Porosidade (η)</i>
Unidade	% ou cm^3/cm^3
Descrição	A porosidade é utilizada para determinar a quantidade de óleo que infiltra na zona não saturada. Além de ser um parâmetro fundamental para a aplicação da equação de Green-Ampt (1911).
Fonte	A determinação da porosidade ou pode ser realizada por experimentos de laboratório ou por meio da relação entre a densidade do solo e a de partículas.
Parâmetro	<i>Índice de Plasticidade (IP)</i>
Unidade	%
Descrição	É utilizada para a determinação da condutividade hidráulica ao óleo por meio da equação de Machado <i>et al.</i> (2016).
Fonte	Análise de campo utilizando a relação entre o limite de plasticidade e o limite de liquidez.
Parâmetro	<i>Textura do solo</i>
Unidade	% ou g/kg^{-1}
Descrição	É utilizada para a definição dos parâmetros da curva de retenção de Van Genuchten (1980) (Tabela 3.5). A combinação

	desse parâmetro com a pressão capilar no solo torna possível pressupor a saturação de água no meio.
Fonte	Análise granulométrica do solo (Argila, Silte e Areia) e classificação pelo triângulo de textura da Embrapa (Figura 3.8).
Parâmetro	<i>Parâmetros Brooks-Corey'</i> (h_{cea} e λ)
Unidade	h_{cea} = cm
Descrição	Define-se como os parâmetros de Brooks-Corey: distribuição dos poros (λ) e pressão de entrada da água (h_{cea}). Esses parâmetros podem ser utilizados para a definição de saturação de água de acordo com a pressão capilar no solo. Além de que λ é utilizado para a definição da carga de LNAPL tanto antes, quanto depois da frente de migração. E o h_{cea} é utilizado para a definição da pressão de entrada de LNAPL.
Fonte	Análise de solo ou parâmetros tabelados de acordo com a textura de solo, ou ainda, por meio da equação de Lenhard na conversão dos valores de Van Genuchten (1980) para Brooks; Corey (1964).
Parâmetro	<i>Saturação de água no solo</i> (S_w)
Unidade	-
Descrição	Saturação de água no solo, conjuntamente com a saturação residual do ar, é utilizado para definir a máxima saturação de óleo possível na zona não saturada. Além de influenciar na permeabilidade efetiva do óleo no solo e na carga do LNAPL na frente de migração. Não obstante, esse parâmetro influencia também na condutividade hidráulica ao óleo.
Fonte	Pode ser obtida por análises de campo ou pela relação dos parâmetros de Van Genuchten (1980) como apresentado no 4.4.1.
Parâmetro	<i>Saturação residual água no solo</i> (S_{rw})
Unidade	-
Descrição	A saturação residual da água corresponde a porção de água adsorvida pela partícula de solo e varia de acordo com a textura do solo. Esse parâmetro influencia na determinação da condutividade efetiva do óleo, bem como na carga de LNAPL na frente de migração.
Fonte	Pode ser obtida por meio da relação dos parâmetros de Van Genuchten (1980), como apresentado no item 4.4.1.

Parâmetro	<i>Saturação residual de ar (S_{ar})</i>
Unidade	-
Descrição	Em conjunto com a saturação de água, é utilizada para definir o máximo valor de saturação de óleo na zona não saturada.
Fonte	Podem ser obtidos por meio da relação da equação de Burdine (1953) (item 3.3.3.2).
Parâmetro	<i>Saturação residual de óleo no solo (S_{ro})</i>
Unidade	-
Descrição	É utilizado no cálculo de condutividade efetiva.
Fonte	Assume-se o valor de 0,1 obtido em estudos de Mercer e Cohen (1990).
Parâmetro	<i>Pressão capilar no solo (P_c)</i>
Unidade	kPa
Descrição	É utilizado para definir a saturação de água na zona não saturada. Ex.: 1500 kPa (ponto de murcha) para solo mais seco.
Fonte	-
Características de simulação	
Parâmetro	<i>Altura do lençol freático</i>
Unidade	metros
Descrição	A altura do lençol freático é utilizada como máxima profundidade do domínio de simulação, uma vez que o algoritmo realiza a simulação apenas na zona não saturada.
Fonte	-
Parâmetro	<i>Tempo da lâmina de óleo na superfície</i>
Unidade	segundos
Descrição	Representa o tempo em que a lâmina de óleo permanece constante na superfície do solo e pode interferir na massa infiltrada.
Fonte	-
Parâmetro	<i>Área contaminada</i>
Unidade	m ²
Descrição	Faz parte dos parâmetros de caracterização do cenário de contaminação do LNAPL na zona não saturada.
Fonte	-
Parâmetro	<i>Condutividade hidráulica à água (K_{sw})</i>
Unidade	cm/s
Descrição	Caracterização da condutividade hidráulica da zona não saturada.
Fonte	Ensaio de permeâmetro de Guelph.
Parâmetro	<i>Intervalo de simulação</i>
Unidade	cm
Descrição	Caracteriza o intervalo de cálculo de um passo para outro na simulação.
Fonte	-

Fonte: Elaborada pela Autora.

¹ Entrada opcional no algoritmo.

Os resultados das simulações, que consistem na condutividade hidráulica ao óleo (K_{so}), saturação de óleo (S_o), condutividade efetiva (K_{eo}), fluxo (q), lâmina de óleo na superfície (Tabela 5.2) são exportados em um arquivo *.txt*, em conjunto com a posição da frente de escoamento do LNAPL, caracterizada pela profundidade (cm) e o tempo (s).

Tabela 5.2. Descrição dos parâmetros de saída do algoritmo.

Caracterização da frente de escoamento	
Parâmetro	<i>Condutividade hidráulica ao óleo (K_{so})</i>
Unidade	cm/s
Descrição	Representa a capacidade da zona não saturada em migrar o LNAPL.
Fonte	É obtido a partir da equação de Machado <i>et al.</i> (2016), equação 16.
Parâmetro	<i>Saturação de óleo (S_o)</i>
Unidade	-
Descrição	Representa a máxima saturação de óleo que o meio poroso suporta.
Fonte	É obtida por meio da relação com a saturação de água e de ar, apresenta na equação 29.
Parâmetro	<i>Condutividade efetiva (K_{eo})</i>
Unidade	cm/s
Descrição	É o produto entre a permeabilidade relativa e condutividade hidráulica do meio poroso ao óleo. Ou seja, é a capacidade do fluido ser transportado no solo, levando em consideração a geometria dos poros, a molhabilidade, distribuição e saturação do fluido.
Fonte	É o cálculo do produto entre a permeabilidade relativa (equação 19) e a condutividade hidráulica do meio poroso ao óleo – Equação de Machado <i>et al.</i> (2016) - apresentada na equação 16.
Parâmetro	<i>Fluxo de óleo (q)</i>
Unidade	cm/s
Descrição	É o fluxo de óleo que migra na zona não saturada.
Fonte	Definido pela equação 23.
Parâmetro	<i>Massa</i>
Unidade	Kg
Descrição	É a massa de óleo infiltrada na zona não saturada. Esse parâmetro é utilizado para a verificação da conservação de massa.
Fonte	O cálculo realizado é o produto entre a altura de lâmina infiltrada e as propriedades do fluido.

Parâmetro	<i>Lâmina de óleo na superfície (H_s)</i>
Unidade	cm
Descrição	É a altura da lâmina que resta na superfície para infiltrar no solo. A simulação ocorre até o fim da lâmina na superfície.
Fonte	É a diferença entre a altura da lâmina de óleo inicial e o quanto já infiltrou, definido pela equação 30.

Fonte: Elaborado pela Autora.

5.2. Comparação e verificação do algoritmo proposto com o *software* HSSM

Para comparar o algoritmo proposto com o *software* HSSM foram realizadas oito simulações, das quais quatro correspondem a situação em que a altura da lâmina de óleo instantaneamente começa a reduzir – cenário I –, enquanto as outras quatro representam a situação em que a altura da lâmina de óleo permanece constante por 10 segundos, começando a decrescer após esse tempo – cenário II – (Tabela 4.2). Para as oito simulações com o algoritmo proposto em Python utilizou-se o espaço de discretização equivalente a 0,01 cm. Enquanto para o HSSM, o tempo de discretização foi de aproximadamente 0,15 min.

Como já abordado no item 5.1, para a simulação no algoritmo proposto, é necessário determinar o índice de plasticidade (IP) do solo avaliado. Assim, como o tipo de solo utilizado na validação do algoritmo pertence à classe arenosa (ver item 4.2), considerou-se IP igual a 0, uma vez que de acordo com a Tabela 3.4 esse valor é característico para solos sem plasticidade, como é o caso das areias. Desta forma, a fim de averiguar a similaridade entre os programas comparou-se os seguintes resultados: tempo e posição da frente de escoamento, condutividade hidráulica ao óleo, condutividade efetiva do óleo e saturação do óleo (Tabela 5.3 e Tabela 5.4).

Os parâmetros, condutividade hidráulica ao óleo, condutividade efetiva do óleo e saturação do óleo, apresentaram os mesmos resultados em ambos os programas utilizados - HSSM e algoritmo proposto - caracterizando assim a correta aplicação das equações de base (ex.: Burdine (1953), Brooks-Corey (1964), Van Genuchten (1980), Machado *et al.* (2016)) (Tabela 5.3).

Dentre os parâmetros analisados destaca-se, principalmente, o resultado da condutividade hidráulica ao óleo (K_{so}), uma vez que essa é determinada por diferentes equações nos modelos matemáticos, sendo que o *software* HSSM utiliza a equação de Nutting (1934), e no algoritmo proposto em Python optou-se pela utilização da equação de Machado *et al.* (2016). Em solos arenosos, não ocorre a interação elétrica entre

o fluido e as partículas e, portanto, esperava-se que os resultados obtidos por Nutting (1934) e Machado *et al.* (2016) fossem similares. Cabe destacar que a equação de Machado *et al.* (2016) retrata melhor os fenômenos físicos que ocorrem durante o processo de infiltração do óleo, como descrito no item 3.3, e, conseqüentemente, se obtêm valores mais próximos à realidade, em situações de solo argiloso.

Tabela 5.3. Resultados dos parâmetros: condutividade hidráulica ao óleo, condutividade efetiva do óleo e saturação do óleo para o algoritmo (python) e HSSM.

Simulação		Condutividade hidráulica ao óleo		Condutividade efetiva do óleo		Saturação de óleo	
		K_{so} (cm/s)	hi-óleo	HSSM	Python	HSSM	Python
Cenário I	A	$1,50 \times 10^{-2}$	$1,50 \times 10^{-2}$	$6,43 \times 10^{-3}$	$6,43 \times 10^{-3}$	0,77	0,77
	B	$1,50 \times 10^{-2}$	$1,50 \times 10^{-2}$	$5,37 \times 10^{-3}$	$5,37 \times 10^{-3}$	0,71	0,71
	C	$1,60 \times 10^{-2}$	$1,60 \times 10^{-2}$	$5,71 \times 10^{-3}$	$5,71 \times 10^{-3}$	0,71	0,71
	D	$1,50 \times 10^{-2}$	$1,50 \times 10^{-2}$	$5,71 \times 10^{-3}$	$6,43 \times 10^{-3}$	0,77	0,77
Cenário II	AII	$1,50 \times 10^{-2}$	$1,50 \times 10^{-2}$	$6,43 \times 10^{-3}$	$6,43 \times 10^{-3}$	0,77	0,77
	BII	$1,50 \times 10^{-2}$	$1,50 \times 10^{-2}$	$5,37 \times 10^{-3}$	$5,37 \times 10^{-3}$	0,71	0,71
	CII	$1,60 \times 10^{-2}$	$1,60 \times 10^{-2}$	$5,71 \times 10^{-3}$	$5,71 \times 10^{-3}$	0,71	0,71
	DII	$1,50 \times 10^{-2}$	$1,50 \times 10^{-2}$	$6,43 \times 10^{-3}$	$6,43 \times 10^{-3}$	0,77	0,77

Fonte: Elaborado pela Autora.

Os resultados da frente de escoamento determinados pelo algoritmo proposto se apresentaram coerentes com os resultados obtidos no HSSM, visto que diferença entre o tempo máximo de infiltração foi de aproximadamente 2 min, enquanto o resíduo da profundidade máxima alcançada foi menor que 1 cm (Tabela 5.4, Figura 5.2 e Figura 5.3). As diferenças obtidas entre os *softwares* podem ser observadas nos gráficos da frente de migração (Figura 5.2 e Figura 5.3), no qual nota-se um padrão em que o algoritmo subestima o tempo da frente de escoamento do LNAPL, quando comparado com o HSSM. Essa diferença entre os resultados pode estar correlacionada com o método de resolução utilizado, visto que o método de resolução do algoritmo desenvolvido é analítico, enquanto o método de resolução do HSSM é numérico.

Os resíduos entre os resultados obtidos no algoritmo e no HSSM para os cenários I e II são apresentados na forma de *Box Plot* (Figura 5.4). Destaca-se que os tamanhos das amostras dos resíduos são diferentes para cada um destes cenários, uma vez que para a determinação dos resíduos é necessário comparar as profundidades obtidas para cada tempo, nos modelos matemáticos (HSSM e algoritmo). Assim, os tamanhos das amostras para os resíduos do primeiro cenário – AI, BI, CI, DI-

variaram entre 31 e 38 dados, enquanto que para o segundo cenário – AII, BII, CII, DII - os tamanhos das amostras variaram de 52 a 60 dados.

Infere-se, a partir das estatísticas, que as simulações do cenário I - AI, BI, CI e DI -, apresentaram quatro *outliers*, com os resíduos variando entre 2,25 a 3,67 cm (Figura 5.4). Ao mesmo tempo, para o cenário II, os resíduos variaram entre 0,53 e 0,59 cm, sendo que a média entre os resíduos não foi superior à 0,69 cm (Tabela 5.4). Outro ponto de destaque é em relação aos *outliers*, uma vez que os cenários simulados não apresentaram nenhum ponto acima do limite superior.

Tabela 5.4. Análise estatística dos resultados obtidos nas simulações do algoritmo e no HSSM.

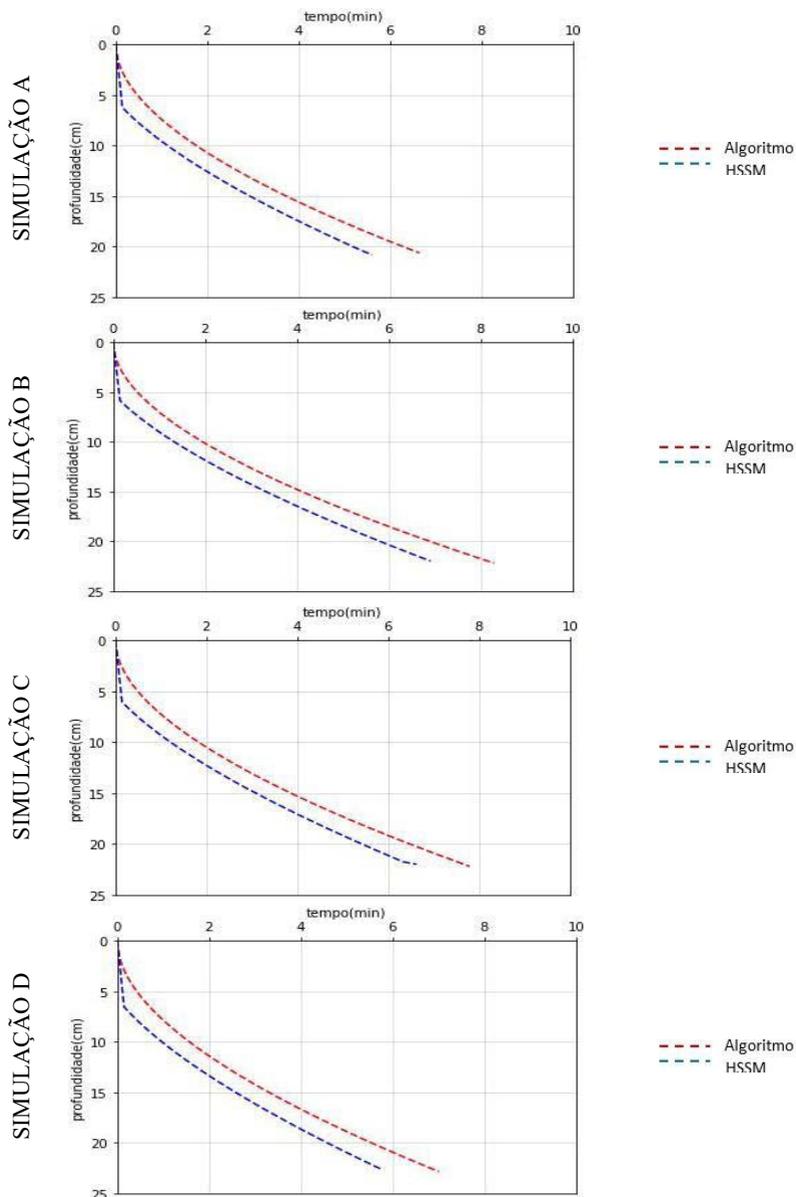
Cenários		Cenário I			
		AI	BI	CI	DI
Médias dos resíduos (cm)		1,98	1,82	1,91	2,10
Mediana dos resíduos (cm)		1,93	1,74	1,83	2,03
Q1		1,87	1,67	1,76	1,94
Q3		2,04	1,89	1,97	2,14
AI		0,17	0,22	0,21	0,2
Tempo máximo de infiltração(min)	Algoritmo	6,64	8,29	7,79	7,01
	HSSM	5,47	6,19	6,34	5,76
	Resíduo	1,17	1,38	1,46	1,25
Profundidade máxima de infiltração (cm)	Algoritmo	20,64	22,21	22,21	22,87
	HSSM	20,58	22,00	21,77	22,64
	Resíduo	0,06	0,21	0,44	0,23

Cenários		Cenário II			
		AII	BII	CII	DII
Médias dos resíduos (cm)		0,67	0,68	0,66	0,69
Mediana dos resíduos (cm)		0,67	0,63	0,65	0,70
Q1		0,40	0,40	0,40	0,38
Q3		0,93	0,91	0,92	0,97
AI		0,53	0,51	0,52	0,59
Tempo máximo de infiltração(min)	Algoritmo	8,16	9,93	9,38	8,51
	HSSM	7,06	8,78	8,35	7,34
	Resíduo	1,11	1,15	1,03	1,17
Profundidade máxima de infiltração (cm)	Algoritmo	23,63	25,02	25,12	26,02
	HSSM	23,18	24,69	24,90	25,49
	Resíduo	0,45	0,33	0,22	0,53

AI = Amplitude interquartil; Q1 = Primeiro quartil; Q3 = Segundo quartil.

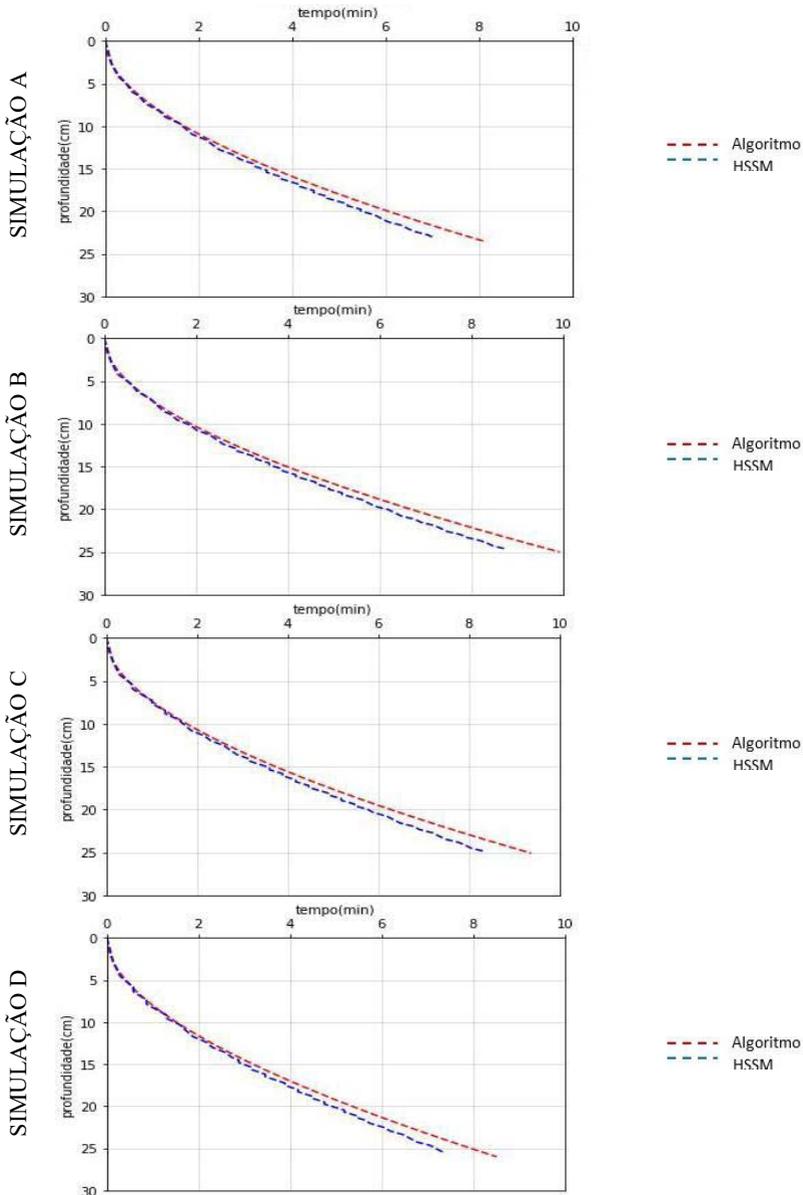
Fonte: Elaborado pela Autora.

Figura 5.2. Resultados da frente de migração das simulações (A, B, C e D) para o cenário I.



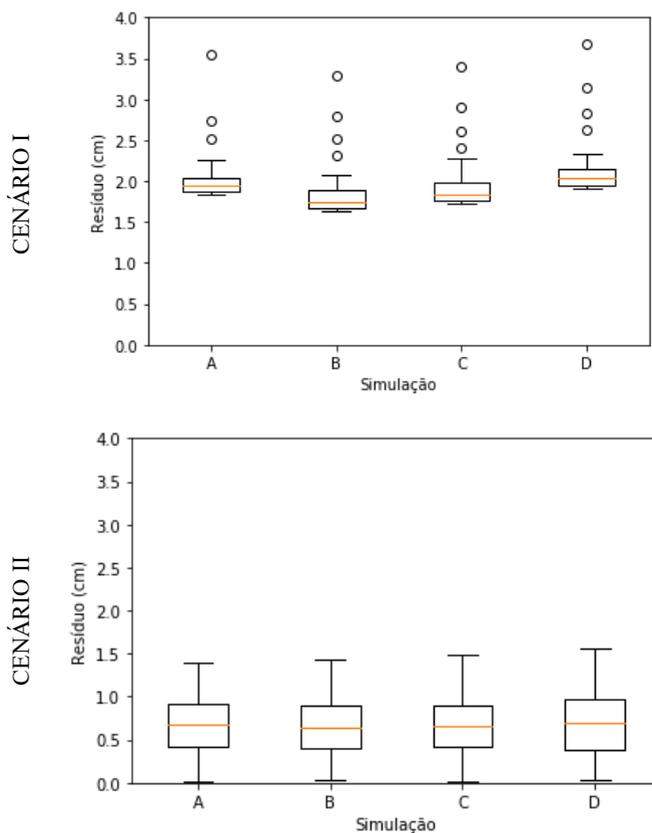
Fonte: Elaborado pela Autora.

Figura 5.3. Resultados da frente de migração das simulações (A, B, C e D) para o cenário II.



Fonte: Elaborado pela Autora.

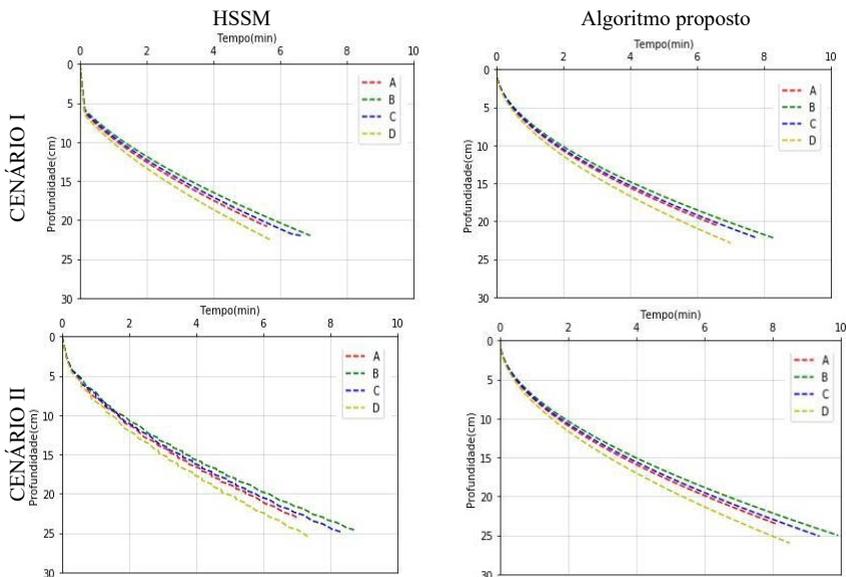
Figura 5.4. *Box Plot* dos resíduos entre os resultados do HSSM e do algoritmo proposto.



Fonte: Elaborado pela Autora.

Ao observar os resultados obtidos para os cenários – A,B,C,D –, nota-se que o padrão de migração foi bastante similar entre os modelos matemáticos (Figura 5.5). As simulações D e A, ambas com a mesma saturação de água ($S_w = 0,0588$), foram as que apresentaram o menor tempo de infiltração em razão da baixa saturação de água quando comparados com os cenários B e C. Ainda, a migração em A é relativamente mais rápida que em D, em virtude de sua porosidade ser relativamente maior do que em D ($\eta_A = 0,41$ e $\eta_D = 0,37$).

Figura 5.5. Comparação entre os resultados das frentes de migração obtidos pelo HSSM e pelo Algoritmo proposto.



Fonte: Elaborado pela Autora.

Em relação as simulações B e C, essas apresentam a mesma porosidade ($\eta = 0,41$) e a mesma saturação de água ($S_w = 0,1129$), porém, diferentes condutividades hidráulicas ao óleo ($K_{oB} = 1,50 \times 10^{-2}$ cm/s e $K_{oC} = 1,60 \times 10^{-2}$ cm/s). Em razão da porosidade e da saturação de água, as taxas de migração naquelas simulações foram menores do que nas simulações A e D, e no final da infiltração atingiram maiores profundidades em tempos maiores. Dado a condutividade hidráulica ao óleo no cenário C ser relativamente maior que a do cenário B, a taxa de migração também é maior na simulação C, desta forma, quando comparado, dados de B e C, para um mesmo tempo, a profundidade alcançada no cenário C é maior.

Nas oito simulações, o mesmo código computacional foi utilizado como base, e, como ocorreu discrepância inicial no comportamento entre a simulação do cenário I ($t=0s$), com o cenário II ($t=10s$) (Figura 5.5), decidiu-se investigar os possíveis parâmetros que poderiam ocasionar esse fenômeno. Para isso, uma série de simulações no *software* HSSM foi realizada, tomando como base o cenário A. Nesse cenário, foi variado a altura da lâmina de óleo (H_s), a porosidade (η), a saturação de

água (S_w), a condutividade hidráulica (K_w), e o tempo de discretização (t_d) (Tabela 5.5). Ressalta-se que à medida que variava um parâmetro, todos os outros parâmetros foram completados de acordo com o cenário A da simulação apresentada na Tabela 3.7.

Tabela 5.5. Parâmetros de variação para simulações no *software* HSSM.

Cenário	H_s (cm)	S_w	η	K_{sw} (cm/s)	t_d (s)
Parâmetro: Altura da lâmina de óleo					
I	6,5	0,0588*	0,37*	78*	60*
II	10	0,0588*	0,37*	78*	60*
III	20	0,0588*	0,37*	78*	60*
IV	50	0,0588*	0,37*	78*	60*
Parâmetro: Saturação de água					
I	6,5*	0,0588*	0,37*	78*	60*
II	6,5*	0,1129*	0,37*	78*	60*
III	6,5*	0,3	0,37*	78*	60*
IV	6,5*	0,5	0,37*	78*	60*
Parâmetro: Porosidade					
I	6,5*	0,0588*	0,2	78*	60*
II	6,5*	0,0588*	0,37*	78*	60*
III	6,5*	0,0588*	0,41*	78*	60*
IV	6,5*	0,0588*	0,5	78*	60*
Parâmetro: Condutividade hidráulica à água					
I	6,5*	0,0588*	0,37*	50	60*
II	6,5*	0,0588*	0,37*	78*	60*
III	6,5*	0,0588*	0,37*	83*	60*
IV	6,5*	0,0588*	0,37*	100	60*
Parâmetro: Tempo de discretização					
I	6,5*	0,0588*	0,37*	78*	0,6
II	6,5*	0,0588*	0,37*	78*	6
III	6,5*	0,0588*	0,37*	78*	60*
IV	6,5*	0,0588*	0,37*	78*	120

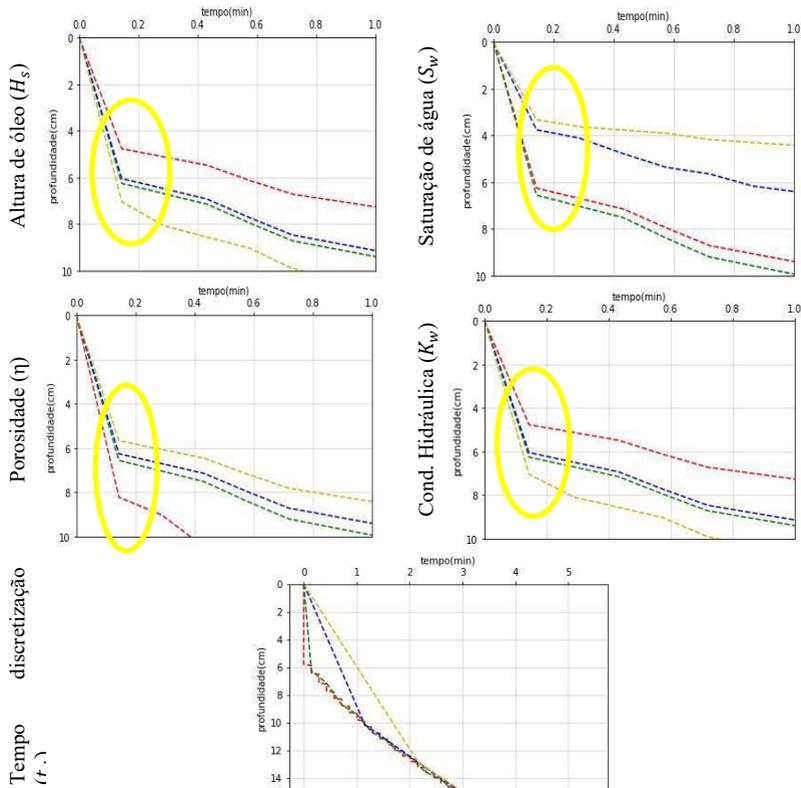
*Valores de base do cenário A de validação

Fonte: Elaborado pela Autora.

A partir dos resultados obtidos nas simulações no *software* HSSM, Figura 5.5, nota-se que é padrão o decaimento brusco logo no início da infiltração, e que provavelmente esteja relacionado com o tempo de discretização utilizado, uma vez que foi utilizado o mesmo valor, 60 segundos, em todas as simulações, exceto pela simulação em que se alterava esse parâmetro. Como pode ser observado, quanto maior é o tempo de discretização, mais longe o primeiro ponto é apresentado, como esperado, uma vez que o *software* HSSM não apresenta todos os resultados, apenas alguns desses. Ainda, constata-se que para a curva de

$t_d = 0,6$ segundos (vermelho), os pontos da frente de migração apresentaram um comportamento semelhante ao decaimento na forma de “escada”, e isso ocorreu em razão de um baixo tempo de discretização, que acarretou um arredondamento nos intervalos de tempo.

Figura 5.6. Resultado das simulações no HSSM para a verificação da frente de escoamento no primeiro ponto de análise. As cores das legendas das curvas: Vermelho (Cenário I); Azul (Cenário II); Verde (Cenário III); Laranja (Cenário IV).



Fonte: Elaborado pela Autora.

5.3. Análise de sensibilidade

Para a realização da análise de sensibilidade dos parâmetros utilizados no algoritmo desenvolvido foram criados dois novos algoritmos em Python, sendo que um é responsável por gerar as amostras de dados para cada um dos parâmetros avaliados e o outro para a aplicação do *bootstrap* em conjunto com as análises estatísticas.

No algoritmo de definição das amostras aplica-se os valores apresentados na Tabela 4.3, e desta forma obtém-se a frente de escoamento para cada uma das simulações. A partir da definição das amostras, utilizou-se a rotina *bootstrap*, para a qual foi necessária definir uma profundidade de base, e, assim, comparar com os demais tempos obtidos para a mesma profundidade. Neste estudo, foi utilizada como base a profundidade 0,2 cm, a fim de reduzir o tempo de processamento do algoritmo (Tabela 5.6).

Tabela 5.6. Exemplo dos tempos, em segundos, obtidos para 0,2 cm de infiltração

Simulação	Parâmetros						
	η	IP	S_{wr}	S_w	S_{or}	K_w	Hs
	Tempo (s) a 0,2 cm de profundidade						
1º	15,69	109,60	96,94	24,14	41,38	110,31	82,42
2º	17,26	104,04	95,96	24,97	42,35	109,25	78,06
3º	18,83	99,37	94,97	25,85	43,42	108,21	74,15
4º	20,41	95,41	94,00	26,79	44,52	107,21	70,61

Fonte: Elaborado pela Autora.

A partir dessas amostras aplicou-se o *bootstrap* com 100.000 reamostragens, gerando as curvas apresentadas na Figura 5.7, bem como a análise estatística de cada um dos parâmetros, apresentada na Tabela 5.7.

Infere-se por meio dos resultados obtidos que a média e a mediana das amostras foram bastante similares, indicando distribuição normal das amostras, o que também pode ser corroborado com os valores obtidos pela Curtose, na qual todos os valores foram aproximadamente nulos. Ademais, as médias das amostras foram bastante similares entre os parâmetros, variando de 72,49 a 81,33 segundos. Já o desvio padrão, que representa a medida de dispersão dos dados, pôde-se notar que os resultados foram bastante discrepantes entre os parâmetros, sendo que, em ordem decrescente, os parâmetros com maior dispersão foram: saturação de água, saturação residual de óleo, porosidade, altura da lâmina de óleo, condutividade hidráulica à água, índice de plasticidade, e satu-

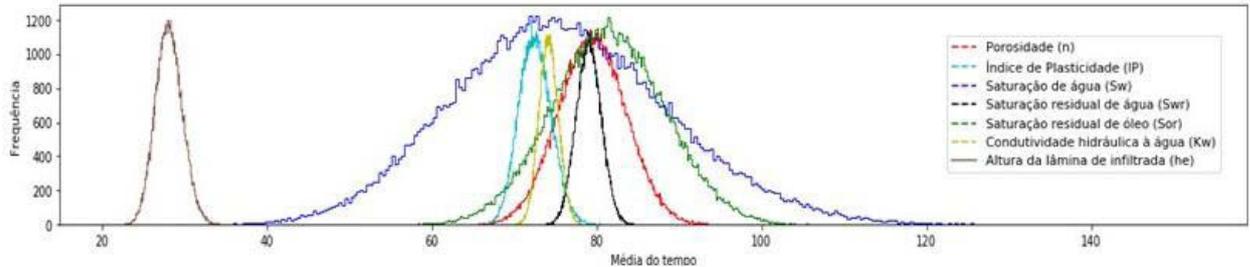
ração residual de água. Aquele que possui maior dispersão de dados, conseqüentemente, possui uma maior sensibilidade, necessitando de um maior cuidado na atribuição de valores. Como constatado por meio da análise de *bootstrap*, esperava-se uma maior sensibilidade para o parâmetro saturação de água, uma vez que ele é utilizado tanto no modelo matemático para determinar a condutividade hidráulica ao óleo, quanto para determinar a saturação de óleo no solo, parâmetro também utilizado pela equação de Green-Ampt (1911).

Tabela 5.7. Análise estatística dos parâmetros utilizados para a análise de sensibilidade (*bootstrap*).

ESTATÍSTICA	Parâmetro	Porosidade (η)	Índice de Plasticidade (IP)	Saturação residual de água (S_{wr})	Saturação de água (S_w)	Saturação residual de óleo (S_{or})	Condutividade hidráulica à água (K_w)	Altura lâmina de óleo (Hs)
		<i>Média</i> _{amostra}	79,42	72,49	78,97	75,83	81,33	74,11
	<i>Desvio Padrão</i> _{amostra}	37,28	12,82	9,86	106,4	44,15	14,61	16,48
	<i>Média</i> _{bootstrap}	79,43	72,49	78,97	75,87	81,34	74,11	28,06
	<i>Desvio Padrão</i> _{bootstrap}	4,11	1,98	1,52	13,12	6,81	1,18	1,64
	<i>Medianda</i> _{bootstrap}	79,43	72,42	78,96	75,36	81,27	71,09	28,02
	<i>Curtosis</i> _{bootstrap}	-0,016	-0,0025	-0,0593	0,0406	-0,0354	-0,0089	0,0332

Fonte: Elaborado pela Autora.

Figura 5.7. Histograma das frequência dos tempos (s) obtidos, em segundos, como resultado da aplicação do *bootstrap* para as variáveis: porosidade (η), índice de plasticidade (IP), saturação de água (S_w), saturação residual de água (S_{wr}), saturação residual de óleo (S_{or}), condutividade hidráulica à água (K_w) e altura da lâmina de óleo na superfície (Hs)



Fonte: Elaborado pela Autora.

5.4. Estudo de caso

5.4.1. Parâmetros físicos da zona não saturada

Para realizar as simulações do derramamento de LNAPL na zona não saturada, foi realizada a caracterização dos parâmetros físicos de cada uma das dezessete áreas selecionadas. Como descrito no item 4.4.1, tanto para a coleta da análise de solo quanto para o ensaio com Permeâmetro Guelph, foi necessária condição de clima seco e estável. Observando essas condições, as coletas e os ensaios foram realizados, geralmente, após três dias sem chuva, com exceção das subestações E e K, nas quais as coletas foram realizados após um dia sem chuva (Tabela 5.8).

A partir das coletas e dos ensaios realizados, obteve-se os resultados das análises de solos – análise granulométrica, índice de plasticidade, porosidade, condutividade hidráulica à água – (Tabela 5.9). Com base nas análises granulométricas, os solos das subestações foram classificados conforme a textura (Figura 3.8), tornando possível correlacionar essa classificação com os parâmetros de Van Genuchten (1980) – conteúdo volumétrico saturado, conteúdo volumétrico residual, n e α -, apresentados na Tabela 3.5. A partir disso, foi possível determinar a saturação de água, tanto em condições de solo seco ($\psi = 1500\text{kPa}$), como em condições de solo úmido ($\psi = 33\text{kPa}$), utilizando a equação 02 e a equação 05. Mediante os valores de Van Genuchten (1980), também foi possível determinar a saturação residual da água com base na equação 06. Já para a saturação do óleo, dado utilizado para a simulação, utilizou-se como padrão o valor 0,1, em razão de ser um solo em grande parte argiloso e conseqüentemente ter uma menor afinidade com o óleo, como conceituado por Mercer e Cohen (1990).

Tabela 5.9. Resumo dos parâmetros das Subestações de Energia Elétrica.

Parâmetros dos solos	% Ar	% Sl	% Ag	LL	LP	IP	ρ_b	ρ_s	η	K_w (cm/s)	S_w^1	S_w^2	S_{wr}	S_{or}	
Subestações	A	22,61	33,44	43,94	59,20	35,32	23,97	1,47	2,77	0,47	-	0,73	0,60	0,49	0,1
	B	55,10	14,08	30,82	29,16	16,12	13,05	1,80	2,58	0,30	3,57E-07	0,67	0,52	0,36	0,1
	C	27,07	29,14	43,79	76,70	41,44	35,26	1,25	2,92	0,57	5,99E-06	0,59	0,49	0,49	0,1
	D	7,09	29,68	63,23	62,86	36,34	26,52	1,06	2,95	0,64	8,92E-07	0,52	0,43	0,43	0,1
	E	52,98	17,52	29,50	37,24	16,66	20,58	1,81	2,86	0,37	4,04E-07	0,55	0,42	0,36	0,1
	F	32,68	34,83	32,49	65,25	32,57	32,68	1,27	2,58	0,51	7,13E-08	0,63	0,48	0,44	0,1
	G	22,82	25,33	51,85	40,27	17,14	23,13	1,85	2,59	0,29	1,43E-07	1,17	0,97	0,49	0,1
	H	14,62	36,32	49,06	55,01	33,56	21,45	1,34	2,58	0,48	6,78E-06	0,69	0,43	0,30	0,1
	I	33,34	42,61	24,06	47,16	28,33	18,82	1,54	2,66	0,42	1,33E-06	0,70	0,58	0,49	0,1
	J	46,18	24,95	28,86	48,55	25,74	22,81	1,45	2,67	0,46	2,50E-06	0,44	0,34	0,36	0,1
	K	38,57	34,87	26,56	41,92	24,34	17,58	1,46	2,76	0,47	1,30E-05	0,62	0,38	0,30	0,1
	L	52,07	19,28	28,65	41,89	22,02	19,87	1,69	2,69	0,37	1,23E-04	0,54	0,42	0,36	0,1
	M	47,91	51,48	0,61	44,23	27,86	16,37	1,47	2,65	0,45	1,30E-05	0,76	0,52	0,37	0,1
	N	4,26	31,65	64,09	57,00	39,00	18,00	1,32	2,66	0,50	2,25E-06	0,67	0,55	0,49	0,1
	O	29,78	41,33	28,89	70,30	38,28	32,02	1,23	2,88	0,57	4,01E-06	0,56	0,43	0,44	0,1
	P	5,08	30,96	63,96	77,00	42,00	35,00	1,51	2,66	0,43	2,73E-06	0,78	0,64	0,49	0,1
Q	6,10	28,11	65,78	54,00	27,00	27,00	1,39	2,59	0,49	7,13E-08	0,68	0,56	0,49	0,1	

¹Úmido; ² Seco; LL: Limite de liquidez; LP: Limite de Plasticidade; IP: Índice de Plasticidade; ρ_b : Densidade aparente; ρ_s : Densidade das partículas; η : Porosidade; Ar: Areia; Sl: Silte; Ag: Argila; K_w : Condutividade hidráulica; S_w : Saturação de água; S_{wr} : Saturação residual de água; S_{or} : Saturação residual do óleo.

Fonte: Elaborado pela Autora.

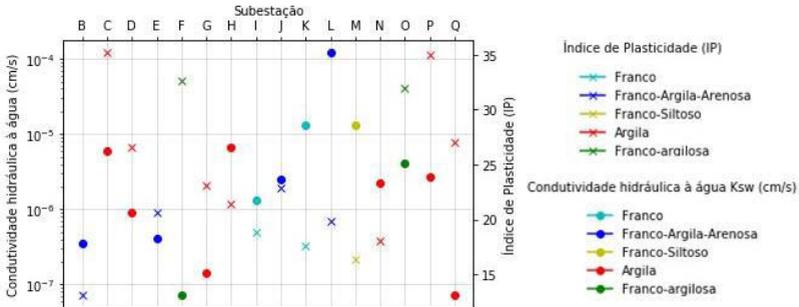
Dentre as dezessete subestações analisadas, oito apresentaram a textura argilosa. Ao correlacionar a textura do solo com o índice de plasticidade (IP), nota-se que as subestações com solo argiloso apresentaram IP variando de 13 a 35,26, sendo que o menor índice corresponde à subestação B, e o maior à subestação C (Tabela 5.9 e Figura 5.9). Os índices de plasticidade entre 10 a 20 são considerados índices médios, enquanto os valores entre 20 a 40 são considerados altos (Tabela 3.4). Ademais, as subestações que apresentaram textura franco, franco-siltoso e franco-argila-arenosa foram as que obtiveram os menores índices de plasticidade (Figura 5.9). Destaca-se a subestação B, com solo franco-argila-arenosa, que apresentou o menor valor para esse parâmetro, aproximadamente 13. É importante ressaltar que o índice de plasticidade sofre influência da matéria orgânica, uma vez que a presença dessa matéria consegue reduzir os limites de liquidez e, conseqüentemente, o índice de plasticidade (HUSEIN MALKAW, ALAWNEH e ABUSAFQAHAH, 1999; KELLER; DEXTER, 2012). Nota-se também que as subestações apresentaram porosidade variando entre 0,3 a 0,7, com destaque para as subestações com solo argiloso e franco-argiloso que apresentaram as maiores porosidades (Figura 5.10).

Em relação a condutividade hidráulica à água nas subestações, sabe-se que esse parâmetro é influenciado pela pressão capilar do solo (seco ou úmido), estrutura, porosidade total, tamanho dos poros condutores (CARDOSO, 2011). A subestação L apresentou a maior condutividade hidráulica à água ($K_{sw} = 1,23 \times 10^{-4}$ cm/s), classificada como franco-argila-arenosa. Já as subestações que apresentaram as menores condutividades hidráulicas foram as subestações E e Q, classificadas como franco-argilosa e argila, respectivamente. Ressalta-se que não foi possível obter a condutividade hidráulica à água na subestação A, devido à presença de uma camada impermeável logo abaixo dos 70 cm.

Ao comparar as condutividades hidráulicas para os solos com a mesma porosidade, pôde-se perceber o seguinte padrão: quanto maior é o índice de plasticidade, menor é a condutividade hidráulica à água (Figura 5.9 e Figura 5.10). Por exemplo, as subestações F, Q e N, com porosidade próximas e com índices de plasticidade de 32, 18 e 27, respectivamente, apresentaram a condutividade hidráulica à água (K_{sw}), equivalente a $7,13 \times 10^{-8}$, $2,25 \times 10^{-6}$ e $7,13 \times 10^{-8}$ cm/s, respectivamente. Já as subestações H, J e K, com índices de plasticidade de 22, 21 e 17, demonstraram condutividade hidráulica à água equivalente a $6,78 \times 10^{-6}$, $2,50 \times 10^{-6}$ e $1,30 \times 10^{-6}$ cm/s. E as subestações C e O, com índices de plasticidade equivalente a 35 e 32, respectivamente, exibiram as seguin-

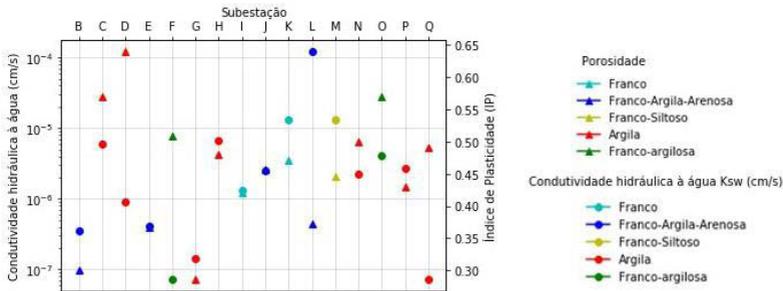
tes condutividades hidráulica à água, em ordem: $5,99 \times 10^{-6}$ e $4,01 \times 10^{-6}$ cm/s.

Figura 5.9. Resultados das análises do índice de plasticidade e da condutividade hidráulica por subestação de energia elétrica



Fonte: Elaborado pela Autora

Figura 5.10. Resultados das análises da porosidade e da condutividade hidráulica por subestação de energia elétrica



Fonte: Elaborado pela Autora

5.4.2. Simulação dos cenários de migração de LNAPL com o *software HSSM* e algoritmo

Nas simulações foram considerados um derramamento de 2.500 L de óleo mineral isolante – LNAPL-, assumindo que o volume de óleo derramado criaria uma lâmina de óleo de 1 cm na superfície do solo abrangendo uma área de 250 m². A altura da lâmina de óleo permanece constante por 10 segundos, e após esse tempo ela começa a reduzir gradualmente, de acordo com a capacidade de infiltração do solo. Em relação a condição do solo, assumiu-se como premissa dois cenários de

saturação de água no solo, sendo que um caracteriza o solo seco, obtido por meio da pressão capilar de 1500 kPa, enquanto o outro define um cenário mais úmido, que é determinado pela pressão capilar de 33kPa. Os valores adotados para a simulação e a fonte de referência dos dados utilizados podem ser vistos na Tabela 5.10. A única diferença na definição de cenário no *software* HSSM e no algoritmo em Python é que o primeiro simula somente até certo dia após a contaminação, e, nesse caso, definiu-se 60 dias. Já o algoritmo proposto, a simulação é até a lâmina de óleo cessar. Ressalta-se que *software* HSSM utiliza a equação de Nutting (1934) para a determinação da condutividade hidráulica ao óleo, enquanto o algoritmo proposto utiliza a equação de Machado *et al.* (2016).

Tabela 5.10. Parâmetros utilizados nas simulações dos estudos de caso

	Valor	Fonte
Caracterização do Fluido		
Densidade do LNAPL (g/cm ³)	0,8847	FISPQ - Tabela 4.4
Viscosidade do LNAPL (cP)	22,11	FISPQ - Tabela 4.4
Tensão superficial do LNAPL (dyna/cm)	31,2	FISPQ - Tabela 4.4
Constante dielétrica do LNAPL	2,2	FISPQ - Tabela 4.4
Densidade da água (g/cm ³)	1	Tabela 4.4
Viscosidade da água (cP)	0,81	Tabela 4.4
Tensão superficial da água (dyna/cm)	72,8	Tabela 4.4
Constante dielétrica da água	80	Tabela 4.4
Caracterização do solo		
Porosidade	Tabela 5.9	Análise de solo – item 4.4.1
Índice de Plasticidade	Tabela 5.9	Análise de solo – item 4.4.1
Textura do solo	Tabela 5.9	Análise de solo – item 4.4.1
Satuação de água	Tabela 5.9	Obtido por meio de Van Genutchen – item 4.4.1
Satuação residual de água	Tabela 5.9	Obtido por meio de Van Genutchen – item 4.4.1
Satuação residual de óleo	Tabela 5.9	Análise de solo – item 4.4.1
Pressão capilar	33 kPa ¹	-
	1500 kPa ²	-
Parâmetros de simulação		
Nível do lençol freático (m)	5,00	-
Tempo da lâmina de óleo (s)	10	-
Altura da lâmina de óleo (cm)	1	-
Área contaminada (m ²)	250	-
Condutividade hidráulica à água (cm/s)	Tabela 5.9	Permeâmetro Guelph - item 4.4.1
Intervalo de simulação (cm)	0,0001	-

¹ Solo úmido; ² solo seco

Fonte: Elaborado pela Autora

5.4.2.1. Comparação entre os resultados obtidos nas simulações com o HSSM e o algoritmo proposto

Em relação aos resultados, destaca-se as discrepâncias entre os resultados das condutividades hidráulicas ao óleo obtidas por meio do HSSM e do algoritmo proposto (Figura 5.11 e a Tabela 5.11). O algoritmo proposto utiliza a equação de Machado *et al.* (2016) para a determinação da condutividade hidráulica ao óleo, que foi até três ordens de grandeza maior, quando comparado pela equação de Nutting (1934), como ocorre no HSSM. As condutividades hidráulicas ao óleo obtidas por meio de Machado *et al.* (2016) – solo úmido e seco - apresentam a mesma ordem de grandeza, sendo que o solo seco tende a apresentar os maiores valores de condutividade hidráulica ao óleo, como era esperado, uma vez que quanto mais seco o solo, maiores são os espaços disponíveis para o fluido migrar no meio poroso (Figura 5.11 e Tabela 5.11). Não obstante, os resultados de condutividade hidráulica ao óleo obtidos pela equação de Machado *et al.* (2016) são até 100 vezes maiores do que as condutividades hidráulicas à água encontrada para os mesmos pontos. As exceções ocorrem para as subestações H, K, M e P, que apresentaram a mesma ordem de grandeza para a condutividade hidráulica ao óleo e a condutividade hidráulica à água.

Oliveira (2001), Amorim (2007), Cardoso (2010) e Machado *et al.* (2016), por meio de experimentos de bancada com diversos fluidos - óleo combustível, petróleo e gasolina -, também obtiveram condutividades hidráulicas ao óleo superiores, em até quatro ordens de grandeza, a condutividade à água. Os autores correlacionaram essas diferenças com a expansividade da argila, devido à presença de argilominerais, e as baixas constantes dielétricas dos fluidos. Apesar das análises realizadas nesse projeto não levarem em conta a presença de argilominerais, parâmetro de grande influência na condutividade hidráulica ao fluido, pode-se notar um comportamento semelhante aos resultados obtidos pelos autores citados, em razão da equação de Machado *et al.* (2016) utilizar o índice de plasticidade, que é um parâmetro indireto da presença de argilominerais, e a constante dielétrica do fluido (ver item 3.3.2). Portanto, a diferença de até 1.000 vezes entre a condutividade hidráulica à água e condutividade hidráulica ao óleo não ocorre quando se utiliza a equação de Nutting (1934), visto que essa não abrange a relação meio poroso/fluido (Tabela 5.11, Figura 5.11 e Figura 5.12).

Em relação a subestações G, não foi possível obter o valor da condutividade hidráulica ao óleo, uma vez que a subestação apresentou uma alta saturação de água no solo, até mesmo para o cenário de solo seco, impedindo a simulação da migração de fluxo de LNAPL na zona não saturada. Essa condição ocorreu devido aos valores dos parâmetros de Van Genuchten (1980) para a argila, e a baixa porosidade, cerca de apenas 29% dos poros livres.

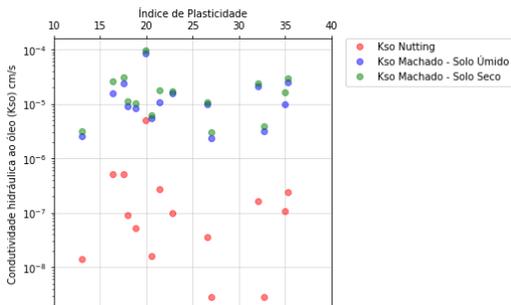
Tabela 5.11. Comparação entre os valores de condutividade da água e condutividade hidráulica ao óleo obtido pelas equações de Machado *et al.* (2016) e Nutting (1934).

SE	Análise de campo K_{sw} (cm/s)	HSSM	Algoritmo proposto		Propriedades do solo IP
		Eq. Nutting K_{so} (cm/s)	Eq. de Machado <i>et al.</i> K_{so} (cm/s)		
			Solo úmido	Solo seco	
B	$3,57 \times 10^{-07}$	$1,43 \times 10^{-08}$	$2,57 \times 10^{-06}$	$3,18 \times 10^{-06}$	13,05
C	$5,99 \times 10^{-06}$	$2,40 \times 10^{-07}$	$2,53 \times 10^{-05}$	$2,89 \times 10^{-05}$	35,26
D	$8,92 \times 10^{-07}$	$3,57 \times 10^{-08}$	$9,91 \times 10^{-06}$	$1,09 \times 10^{-05}$	26,52
E	$4,04 \times 10^{-07}$	$1,62 \times 10^{-08}$	$5,37 \times 10^{-06}$	$6,05 \times 10^{-06}$	20,58
F	$7,13 \times 10^{-08}$	$2,85 \times 10^{-09}$	$3,12 \times 10^{-06}$	$3,88 \times 10^{-06}$	32,68
G ¹	$1,43 \times 10^{-07}$	$5,72 \times 10^{-09}$	-	-	23,13
H	$6,78 \times 10^{-06}$	$2,71 \times 10^{-07}$	$4,49 \times 10^{-06}$	$7,43 \times 10^{-06}$	21,45
I	$1,33 \times 10^{-06}$	$5,33 \times 10^{-08}$	$1,98 \times 10^{-05}$	$2,55 \times 10^{-05}$	18,82
J	$2,50 \times 10^{-06}$	$1,00 \times 10^{-07}$	$1,57 \times 10^{-05}$	$1,68 \times 10^{-05}$	22,81
K	$1,30 \times 10^{-05}$	$5,20 \times 10^{-07}$	$2,37 \times 10^{-05}$	$3,05 \times 10^{-05}$	17,58
L	$1,23 \times 10^{-04}$	$4,92 \times 10^{-06}$	$8,63 \times 10^{-05}$	$9,67 \times 10^{-05}$	19,87
M	$1,30 \times 10^{-05}$	$5,20 \times 10^{-07}$	$1,58 \times 10^{-05}$	$2,58 \times 10^{-05}$	16,37
N	$2,25 \times 10^{-06}$	$9,00 \times 10^{-08}$	$9,03 \times 10^{-06}$	$1,10 \times 10^{-05}$	18
O	$4,01 \times 10^{-06}$	$1,60 \times 10^{-07}$	$2,10 \times 10^{-05}$	$2,44 \times 10^{-05}$	32,02
P	$2,73 \times 10^{-06}$	$1,09 \times 10^{-07}$	$9,85 \times 10^{-06}$	$2,97 \times 10^{-06}$	35
Q	$7,13 \times 10^{-08}$	$2,85 \times 10^{-09}$	$2,35 \times 10^{-06}$	$2,97 \times 10^{-06}$	27

¹ não foi possível determinar a condutividade hidráulica ao óleo devido à alta saturação de água.

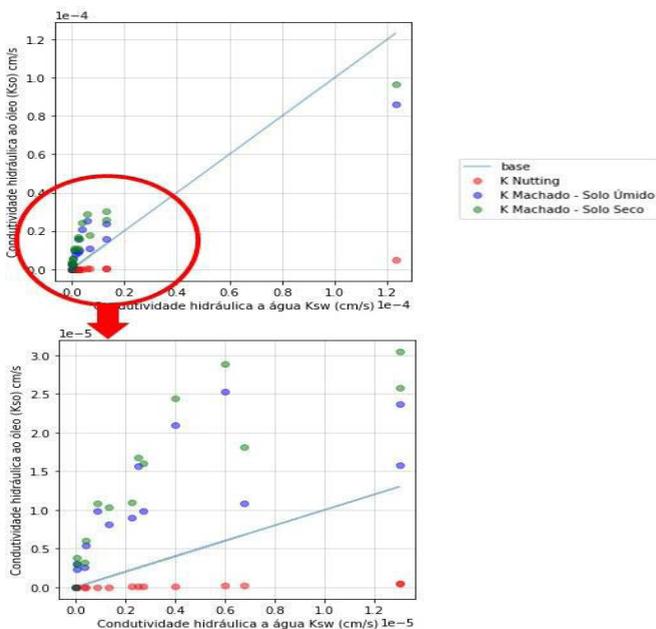
Fonte: Elaborado pela Autora

Figura 5.11. Comparação entre os valores de Condutividade hidráulica ao óleo ao solo quando calculado com a equação de Machado *et al.* (2016), e a equação de Nutting (1934).



Fonte: Elaborado pela Autora

Figura 5.12. Comparação entre os valores da condutividade hidráulica ao óleo obtida pela equação de Machado *et al.* (2016) e pela equação de Nutting (1934) com a condutividade hidráulica à água



Fonte: Elaborado pela Autora.

A discrepância entre a condutividade hidráulica ao óleo obtido por meio de Nutting (1934) e de Machado *et al.* (2016), principalmente em solos com altos índices de plasticidade, resulta em uma grande influência na frente de migração do LNAPL, como pode ser visto nos resultados das frentes de escoamento (Figura 5.13, Figura 5.14, Figura 5.15 e Figura 5.16). Nota-se um padrão em que, todos os cenários simulados no algoritmo proposto, o tempo de infiltração do óleo mineral isolante foi menor do que no *software* HSSM, além de que a migração de LNAPL simulada no algoritmo atingiria profundidades maiores (Figura 5.13, Figura 5.14, Figura 5.15 e Figura 5.16). Essa discrepância está relacionada com o resultado obtido para a condutividade hidráulica ao óleo, que foi até 1.000 vezes maior quando considerado a interação fluido/solo, ou seja, quando utilizado a equação de Machado *et al.* (2016).

Por exemplo, quando simulado no algoritmo, a subestação I, na condição de solo seco, a infiltração de óleo acabaria cerca de 1 dia após o derramamento, com o contaminante atingindo a profundidade de 4 cm. Por sua vez, na simulação com o *software* HSSM, 60 dias após o derramamento, o óleo não haveria infiltrado totalmente, e para esse tempo, o contaminante teria alcançado a profundidade de 2,8 cm. Porém, para essa mesma subestação, considerando o solo úmido, o óleo atingiria a profundidade de 10 cm em 20 dias, quando simulado no algoritmo, enquanto no HSSM em 60 dias de simulação, não haveria a infiltração total do óleo mineral isolante, e esse alcançaria a profundidade de apenas 2 cm. Comportamento semelhante pode ser verificado na subestação N, sendo que em condições de solo seco, na simulação no algoritmo proposto, a infiltração máxima alcançada pelo óleo mineral isolante seria de aproximadamente 5 cm em 2 dias, à medida que na simulação com o *software* HSSM, o óleo atingiria a profundidade de 2 cm em 60 dias, além de que a lâmina de óleo mineral não haveria infiltrado totalmente. No entanto, as subestações C, K, L e M apresentaram um comportamento diferente das demais, visto que a migração do LNAPL, quando simulado no *software* HSSM, na condição de solo seco, atingiu maiores profundidades ou muito próximas às aquelas obtidas pelo algoritmo proposto, só que em tempos bem maiores. Desta forma, a diferença entre os resultados obtidos pelo HSSM e pelo algoritmo proposto é bastante significativa em termos de elaboração de planos de ações emergenciais, isto é, ações que ocorrem no máximo até uma semana após o derramamento, uma vez que as simulações no HSSM subestimam o tempo e a profundidade alcançado pelo contaminante.

Figura 5.13. Comparação entre as frentes de migrações do óleo mineral isolante obtido por meio do HSSM (verde) e do algoritmo (vermelho) (CONTINUAÇÃO).

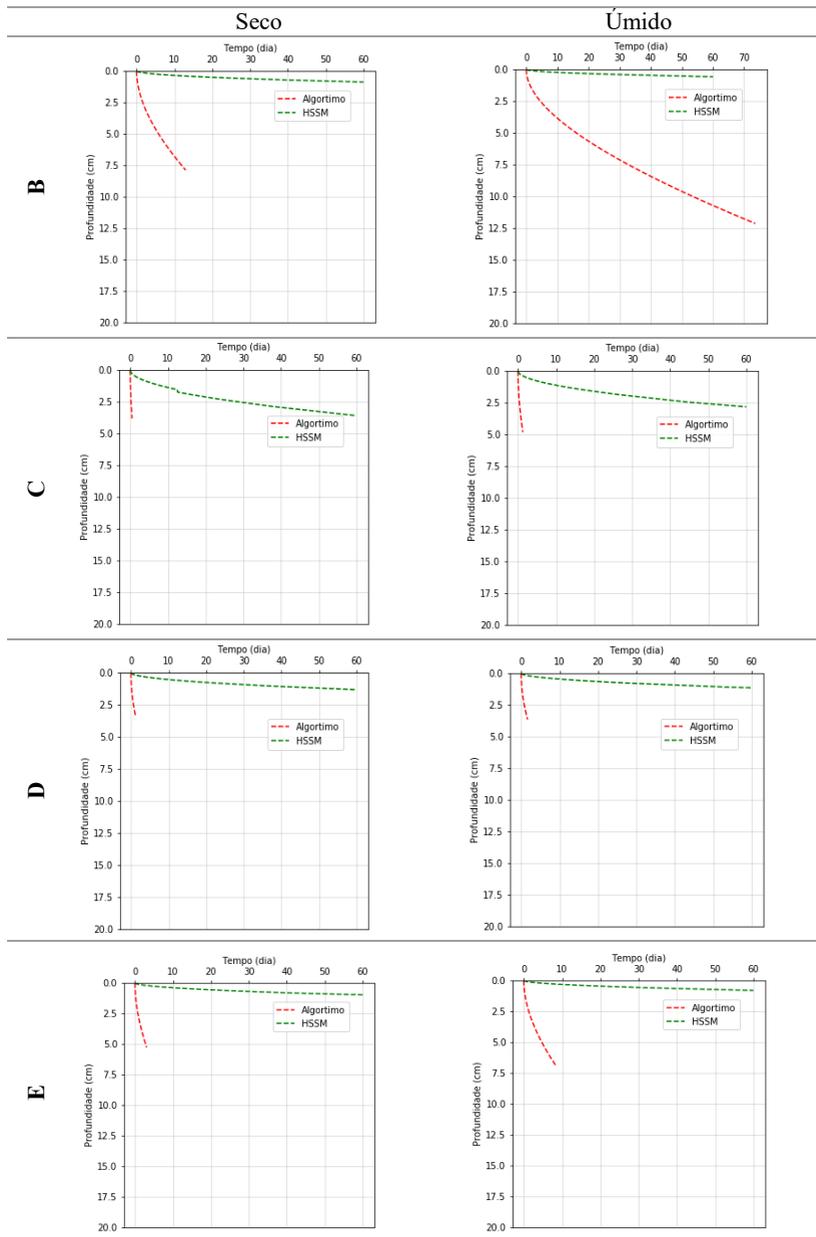


Figura 5.14. Comparação entre as frentes de migrações do óleo mineral isolante obtido por meio do HSSM (verde) e do algoritmo (vermelho) (CONTINUAÇÃO).

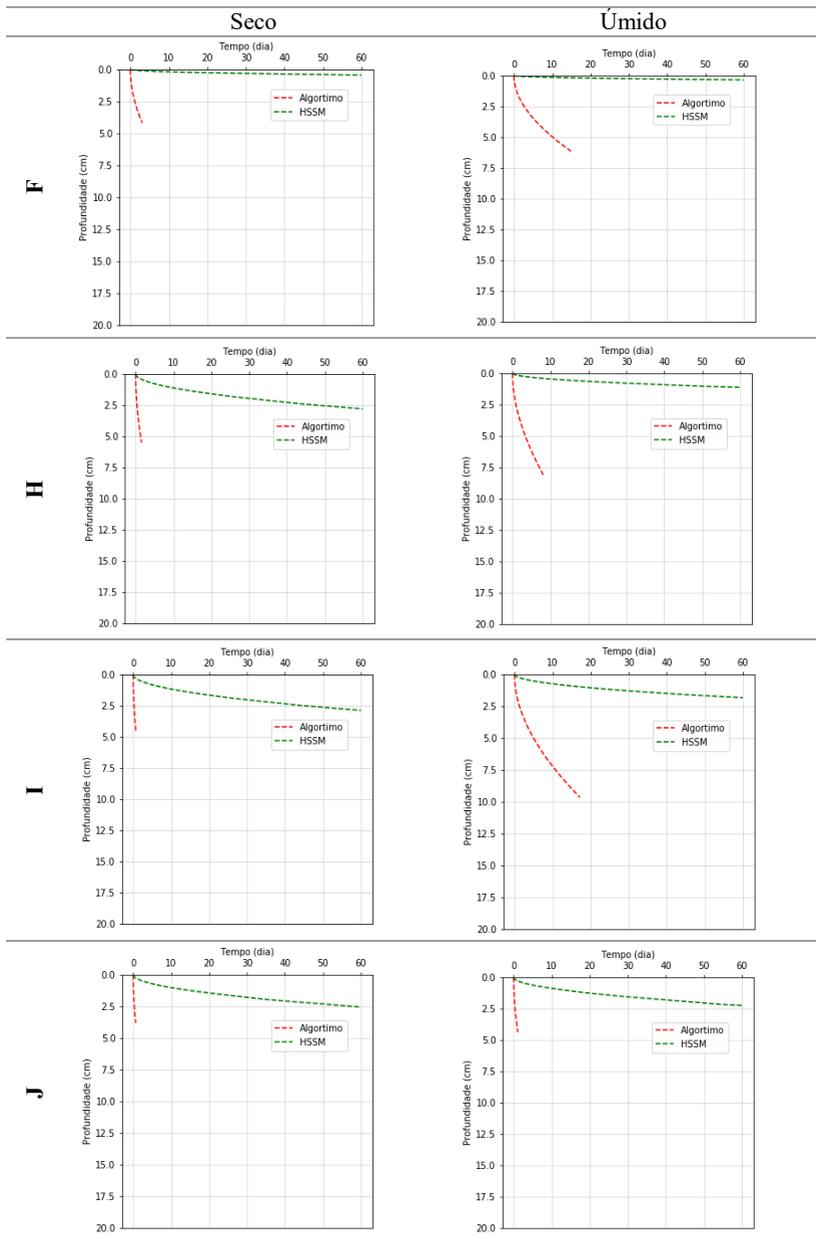


Figura 5.15. Comparação entre as frentes de migrações do óleo mineral isolante obtido por meio do HSSM (verde) e do algoritmo (vermelho) (CONTINUAÇÃO).

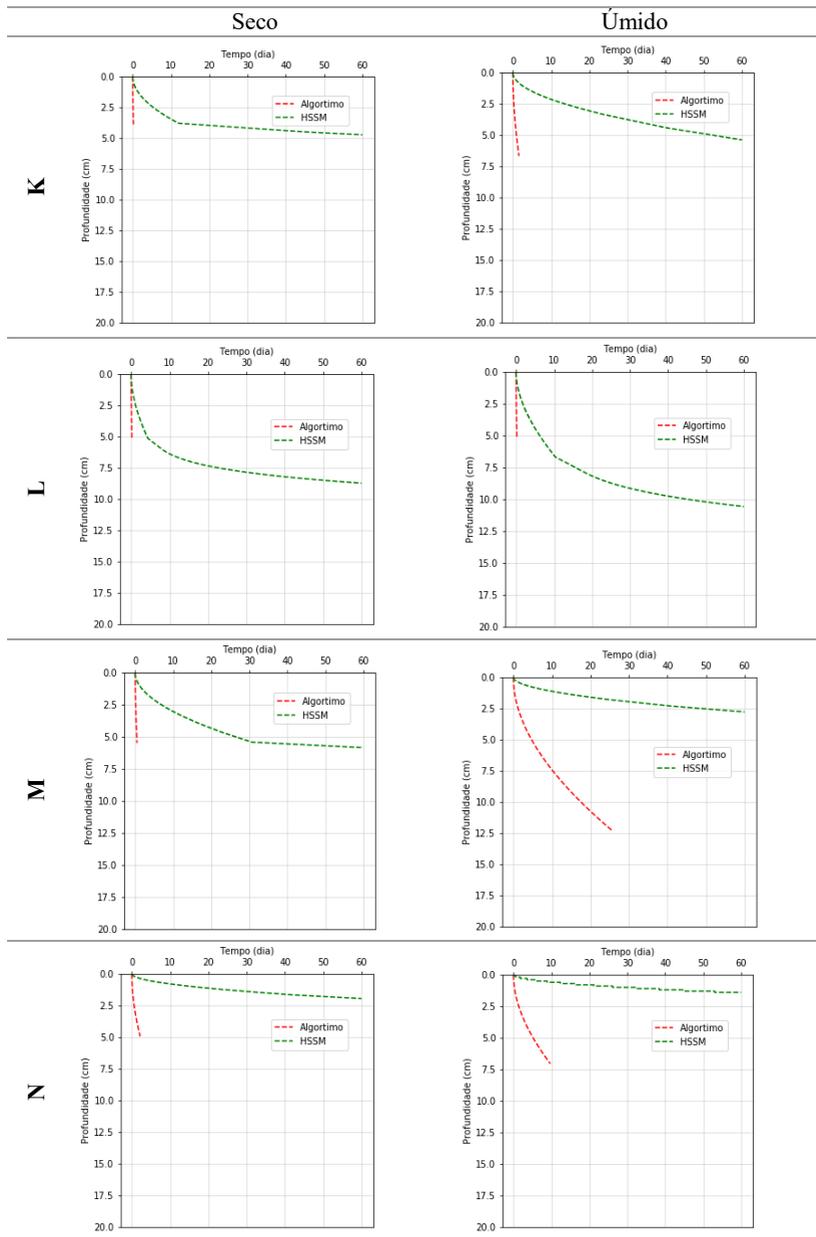
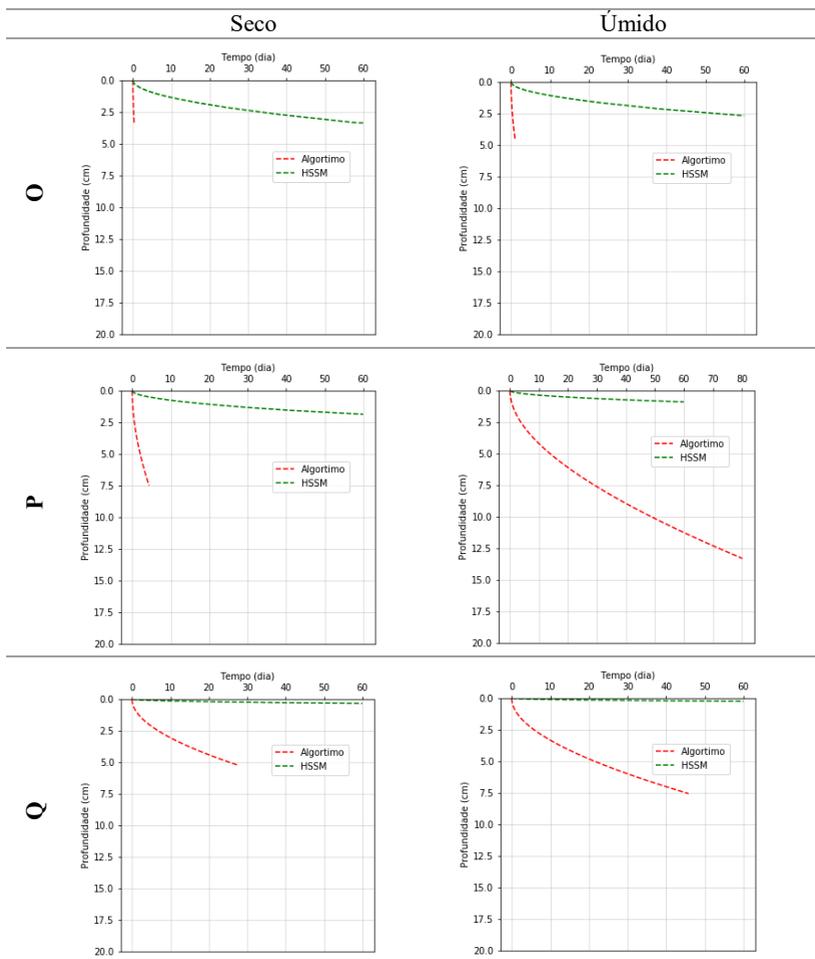


Figura 5.16. Comparação entre as frentes de migrações do óleo mineral isolante obtido por meio do HSSM (verde) e do algoritmo (vermelho) (CONTINUAÇÃO).



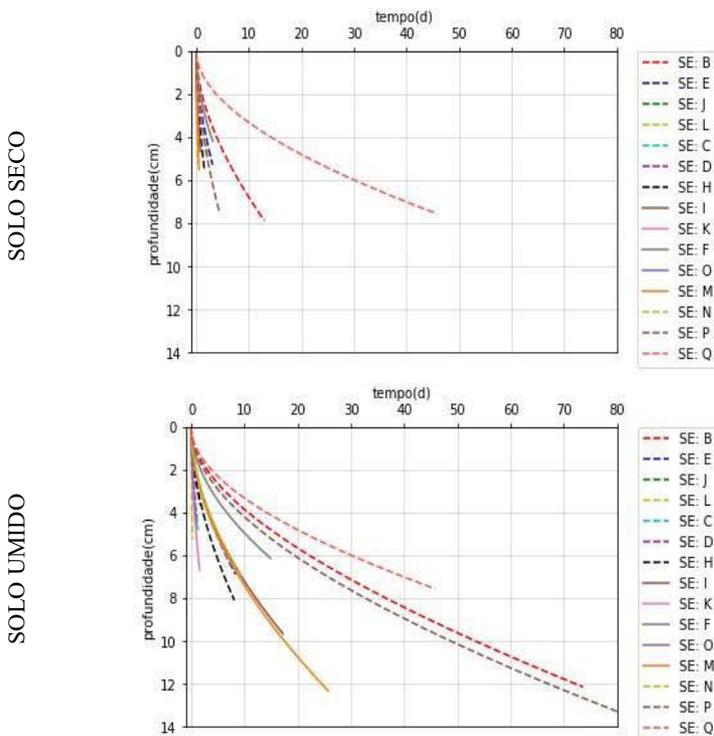
Fonte: Elaborado pela Autora.

5.4.2.2. Influência da saturação de água e da textura do solo nas simulações como o algoritmo proposto

Como já foi visto na análise de sensibilidade (ver item 5.3), a saturação de água apresenta uma grande influência nos resultados das simulações, uma vez que é responsável pela determinação da condutividade hidráulica do meio poroso ao LNAPL, assim como é responsável pela saturação máxima de óleo no solo.

Em simulações de solo seco, a taxa de infiltração, inicialmente, é mais rápida quando comparada com a simulação em solo úmido e, conseqüentemente, a lâmina de óleo na superfície cessa antes. No entanto, em cenários de solo úmido o tempo para a infiltração total do LNAPL aumenta, assim como a profundidade alcançada pelo contaminante (Figura 5.17). Por exemplo, no cenário B, comparando os resultados obtidos pelo algoritmo, a infiltração no cenário de solo seco se encerra próximo aos 12 dias e alcança a profundidade de 7,89 cm (Figura 5.17). Enquanto no cenário de solo úmido, 12 dias após a contaminação o óleo atingiria a profundidade de 4,44 cm, sendo que a infiltração cessaria apenas 73 dias após o derramamento, com o contaminante alcançando 12 cm de profundidade. O mesmo ocorre com a subestação N, na qual a infiltração, na condição de solo seco, acabaria 1,53 dias após o derramamento, com a profundidade máxima de 5,52 cm. Ao passo que no solo úmido, após 1,53 dias a profundidade alcançada seria de 3,29 cm, com a infiltração do óleo cessando em 8 dias e alcançando 8 cm de profundidade (Figura 5.17).

Figura 5.17. Resultado das simulações, utilizando o algoritmo, para as subestações de acordo com a saturação de água no solo.



Fonte: Elaborado pela Autora.

Assim como a saturação de água, a textura também influencia no processo de migração, uma vez que é a partir dessa classificação que se atribui os valores dos parâmetros da curva de retenção de Van Genuchten (1980) (Tabela 3.5). Para comparar a influência da classificação da textura do solo na migração, a partir do cenário de base apresentado na Tabela 5.10, os resultados obtidos pelo algoritmo são disposto na Figura 5.18, Figura 5.19 e

Figura 5.20, que estão classificados de acordo com a textura e saturação de água no solo.

Nota-se que os solos menos argilosos (franco, franco-siltoso e franco-argiloso), foram justamente aqueles em que a migração foi mais rápida, reduzindo o tempo de infiltração. Em condições de solo seco, a infiltração do óleo cessaria em menos de um dia para as subestações I, K, M e O. Em contrapartida, de acordo com os cenários de simulações propostos nesse estudo, a infiltração do óleo na subestação F, caracterizada como solo franco argiloso, cessaria após três dias de contaminação. A discrepância entre as subestações F e O, pode estar correlacionada com a diferença da condutividade hidráulica ao óleo obtida entre as subestações, a qual chegou a diferença de uma ordem de grandeza (Tabela 5.11 e Figura 5.19).

As simulações das frentes de migrações de LNAPL, em condições de solo seco, para as subestações C, J, L, resultaram em uma rápida migração de LNAPL na zona não saturada, apesar que essas apresentaram uma grande quantidade de fração argilosa. Esse fenômeno ocorreu devido às seguintes características da subestação:

- a) Subestação C: a combinação entre alta porosidade, condutividade hidráulica à água alta e saturação de água média; quando comparada com as demais subestações da classe argilosa, garantiu uma infiltração relativamente rápida.
- b) Subestação J: entre as subestações analisadas essa foi a que apresentou a menor saturação, permitindo, assim, um maior espaço para o fluido migrar, acelerando a sua infiltração.
- c) Subestação L: foi a subestação que apresentou a maior condutividade hidráulica à água e condutividade hidráulica ao óleo, originando o aumentando do fluxo de migração do óleo no meio poroso.

Em contraste com as subestações J e L, caracterizadas como franco-argila-arenosa, as subestações B e E, também franco-argila-arenosas, apresentaram baixa porosidade, reduzindo assim o fluxo de migração do fluido, uma vez que há um espaço menor para o fluido percolar. As subestações caracterizadas como argilosas foram as que apresentaram os maiores tempos de infiltração. As subestações P e Q, quando simuladas no cenário de solo seco, apresentaram saturações de água no solo de 49% e baixa condutividade hidráulica do meio poroso ao óleo, $K_{so} = 2,97 \times 10^{-6}$ cm/s. Situação similar a condição de solo seco pôde ser observada na simulação para cenários de solos úmidos, sendo que as subestações Q, P, N e H, apresentaram saturação de água superior a 55%

dos poros, com destaque para a subestação P que apresentou uma saturação de água equivalente a 64%, reduzindo o volume de poros livres para a migração de LNAPL, ocasionando o aumento do tempo de migração.

Figura 5.18. Resultados das simulações das frentes de migração obtidos por meio do algoritmo.

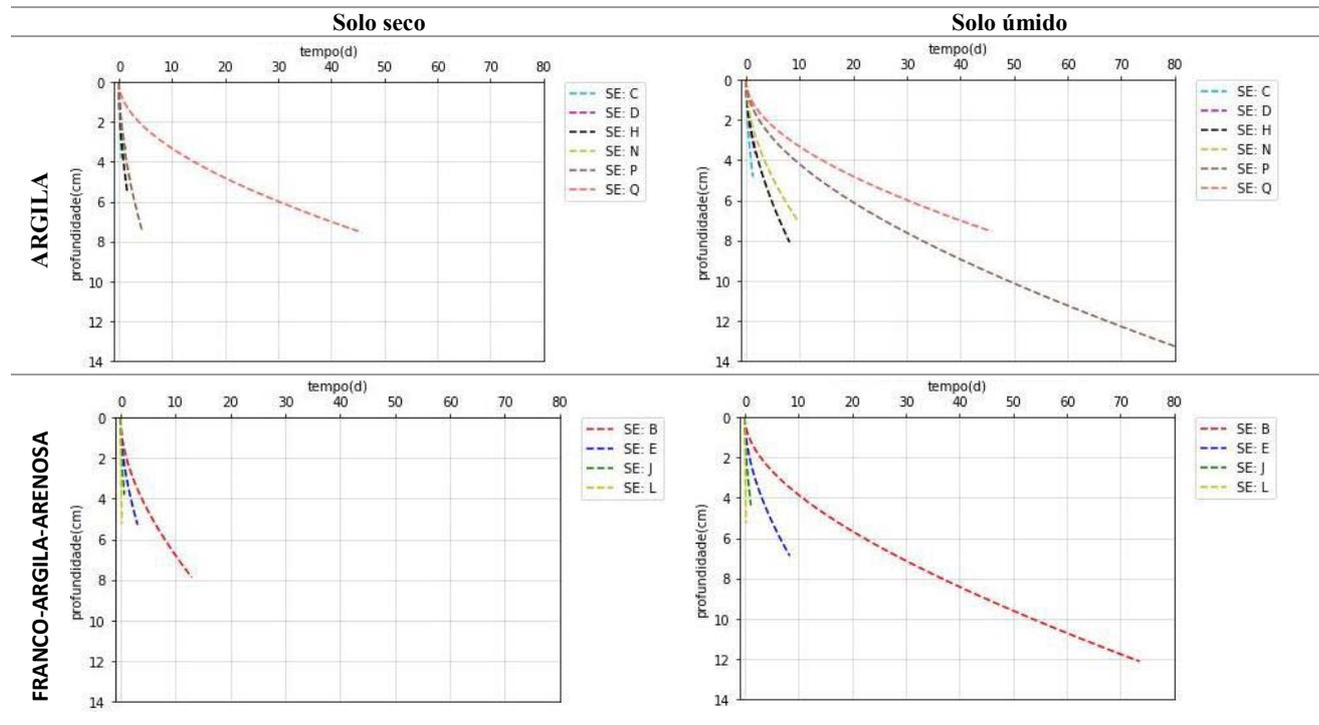


Figura 5.19. Resultados das simulações das frentes de migração obtidos por meio do algoritmo (CONTINUAÇÃO).

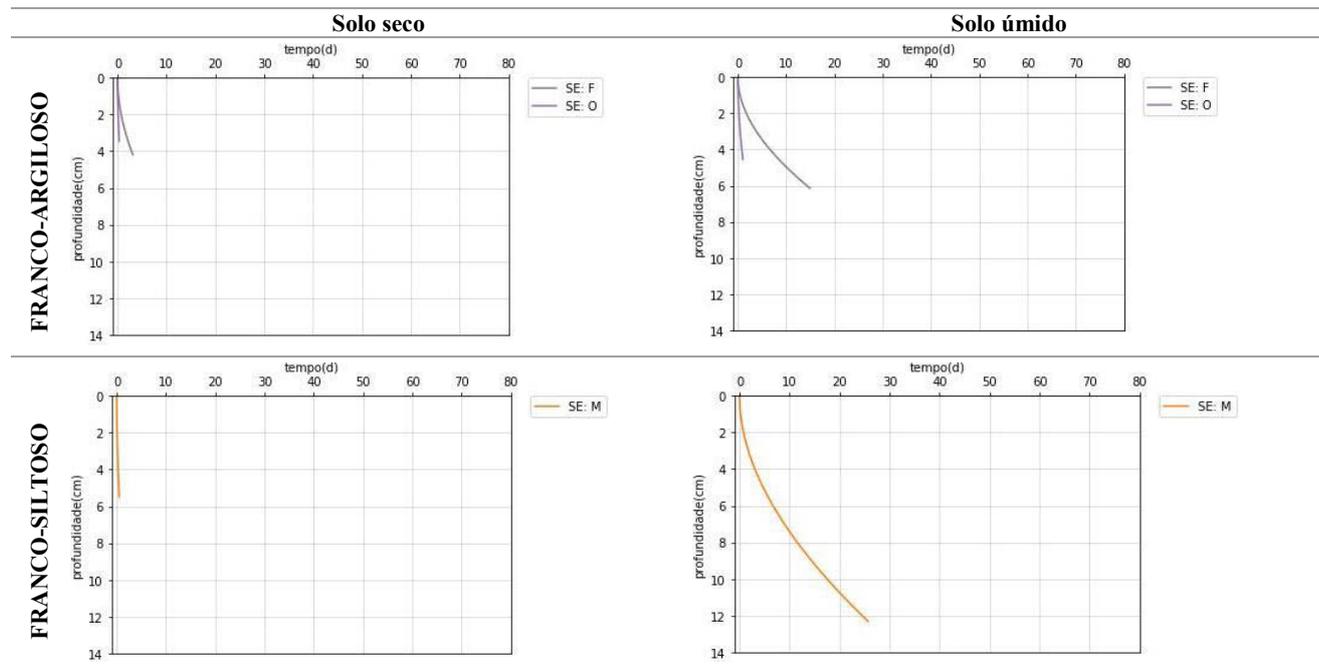
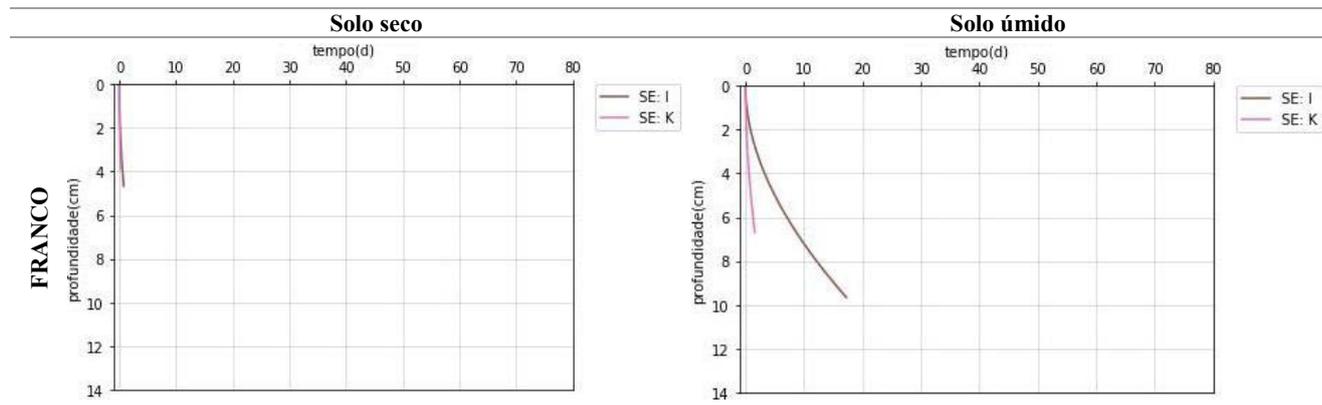


Figura 5.20. Resultados das simulações das frentes de migração obtidos por meio do algoritmo (CONTINUAÇÃO).



Fonte: Elaborado pela Autor

5.4.3. Aplicação do algoritmo proposto para o gerenciamento de planos de ações emergenciais.

Planos de ações emergenciais comumente são utilizados para tomadas de decisões logo após o sinistro, de forma a minimizar a contaminação ambiental. Desta forma, com base nos cenários propostos no item 4.4, analisou-se a profundidade alcançada pelo LNAPL após 1, 3 e 10 dias após a contaminação. Observou-se que para grande parte das subestações a infiltração acabaria antes dos primeiros 10 dias (Tabela 5.12), ou seja, após esse período o líquido se redistribuiria, fenômeno que não é representado no algoritmo proposto (Tabela 5.12).

É evidente que a migração no solo úmido apresenta uma maior duração, quando comparado com a condição de solo seco, em razão do meio poroso possuir menor espaço para a migração. Consequentemente, aumenta o tempo de infiltração, assim como a profundidade alcançada pelo LNAPL. Inicialmente, o cenário de solo seco é a situação mais crítica, uma vez que o contaminante infiltra rapidamente, enquanto os cenários como solo úmido acabam por ser mais crítico ao longo do tempo (Tabela 5.12 e Tabela 5.13).

Para as simulações realizadas nesse estudo, os solos com as maiores frações de areia foram aqueles em que a infiltração do óleo cessou rapidamente, em alguns casos antes de um dia, ficando esse resultado mais evidente em condições de solo seco. A partir das premissas assumidas para as simulações, as subestações L e M foram as que atingiram as maiores profundidades num menor tempo de infiltração, sendo que os tempos máximos de simulação nessas subestações foram de 4,56 e 12,24 horas, respectivamente (Tabela 5.12 e Tabela 5.13). Ao mesmo tempo, as subestações B, P e Q foram as que apresentaram as menores taxas de infiltração e, portanto, os maiores tempos de migração. Após 10 dias da contaminação, as profundidades alcançadas por B e Q foram, em ordem, de 6,80 e 3,06 cm. Em relação ao tempo final de infiltração, a fonte em Q cessou apenas 27 dias após a contaminação, alcançando a profundidade de 5 cm. E a fonte na subestação B encerrou após 12 dias de contaminação, alcançando a profundidade de 7,89 cm. Por fim, a infiltração em P cessou após 4 dias de contaminação, alcançando a profundidade de 6,09 cm. (Tabela 5.12 e Tabela 5.13).

De acordo com a análise de sensibilidade, o parâmetro saturação de água é uma das principais variáveis na migração de LNAPL. Destaca-se que o alto tempo de infiltração na subestação P, é devido à influência dessa variável na simulação, em razão da substância apresentar

a maior saturação de água. Além da subestação P, as subestações B e Q também apresentaram tempos de infiltração superiores, em relação as demais subestações. O tempo final de infiltração de B foi superior ao de Q, em razão da porosidade, segundo principal parâmetro de simulação, de acordo com a análise de sensibilidade (Tabela 5.13).

Tabela 5.12. Resumo das profundidades alcançadas na simulação no algoritmo proposto.

SE	Textura do solo	Solo seco			Solo úmido		
		1 dia	3 dias	10 dias	1 dia	3 dias	10 dias
		Profundidade (cm)					
B	FAA	1,95	3,49	6,80	1,14	2,02	3,85
C	ARG	3,82 ¹	-	-	4,28	-	-
D	ARG	3,05	-	-	2,81	-	-
E	FAA	2,88	5,21	-	2,17	3,91	-
F	FARG	2,32	4,11	-	1,50	2,64	4,96
H	ARG	4,39	-	-	2,63	4,70	-
I	FR	4,66 ¹	-	-	2,17	3,83	7,21
J	FAA	3,80 ¹	-	-	4,14	-	-
K	FR	3,88 ¹	-	-	5,26	-	-
L	FAA	5,25 ¹	-	-	5,25 ¹	-	-
M	FS	5,49 ¹	-	-	2,25	3,95	7,41
N	ARG	3,29	-	-	2,11	3,74	-
O	FARG	3,44 ¹	-	-	4,50	-	-
P	ARG	3,38	6,09	-	1,27	2,24	4,20
Q	ARG	0,93	1,64	3,06	1,01	1,78	3,32

FAA: Franco-argila-arenosa; ARG: Argila; FARG: Franco-argilosa; FR: Franco; FS: Franco-siltoso.

¹ A infiltração cessou antes de 1 dia de simulação.

Fonte: Elaborado pela Autora.

Tabela 5.13. Caracterização da frente de escoamento final das simulações no algoritmo proposto.

SE	Textura do solo	Solo Seco		Solo Úmido	
		Profundidade (cm)	Tempo (d)	Profundidade (cm)	Tempo (d)
B	FAA	7,89	12,97	12,15	73,61
C	ARG	3,82	0,49	4,83	1,25
D	ARG	3,39	1,22	3,66	1,65
E	FAA	5,29	3,08	6,89	8,34
F	FARG	4,19	3,11	6,14	14,91
H	ARG	5,52	1,53	8,10	8,10
I	FR	4,66	0,75	9,66	17,23

SE	Textura do solo	Solo Seco		Solo Úmido	
		Profundidade (cm)	Tempo (d)	Profundidade (cm)	Tempo (d)
J	FAA	3,81	0,66	4,38	1,11
K	FR	3,88	0,17	6,69	1,58
L	FAA	5,25	0,19	5,25	0,19
M	FS	5,49	0,51	12,33	25,73
N	ARG	4,95	2,16	7,06	9,72
O	FARG	3,45	0,34	4,54	1,02
P	ARG	7,50	4,38	13,31	80,24
Q	ARG	5,24	27,66	7,56	45,80

FAA: Franco-argila-arenosa; ARG: Argila; FARG: Franco-argilosa; FR: Franco; FS: Franco-siltoso.

Fonte: Elaborado pela Autora.

6. Conclusão

Muitas ferramentas computacionais disponíveis no mercado, para a simulação de vazamentos de fluidos orgânicos imiscíveis em água, utilizam a formulação matemática de Nutting, na qual a infiltração do fluido no solo é determinada em função da sua densidade, viscosidade e da permeabilidade intrínseca do meio poroso. O *software* HSSM é uma ferramenta computacional amplamente difundida e testada mundialmente, que toma como base a formulação matemática de Nutting. As validações efetuadas pelos seus desenvolvedores foram realizadas por meio de ensaios de permeabilidade em colunas preenchidas com areia, e com o fluido Soltrol 220, um solvente orgânico. Wada (2011) também realizou a validação do HSSM, por meio de ensaios de infiltração em colunas de areia, mas utilizando óleo mineral isolante (OMI). Todos os autores obtiveram bons resultados de calibração com o modelo físico. Contudo, nenhum dos trabalhos de validação contemplou a migração de líquidos orgânicos em meio poroso argiloso.

Diversos estudos demonstram que a constante dielétrica de substâncias apolares, como o OMI, também pode influenciar a migração vertical desses fluidos na zona vadosa de solos argilosos, além dos parâmetros de Nutting. Nesse contexto, foi desenvolvido um novo algoritmo com o propósito de simular a migração vertical de OMI na zona não saturada, considerando o processo de infiltração do fluido orgânico, assim como a sua interação com as frações argilosas expansivas. O algoritmo proposto integra as formulações matemáticas de Green-Ampt (1911), Machado *et al.* (2016), Brooks-Corey (1964) e Van Genuchten (1980), onde o índice de plasticidade foi adotado como parâmetro representativo da expansividade dos solos argilosos.

As simulações matemáticas da infiltração de OMI na zona não saturada, realizadas com o modelo HSSM e o modelo proposto, em dezesse subestações de energia, demonstraram que as diferenças nas condutividades hidráulicas ao OMI foram até três ordens de grandeza superiores aos resultados obtidos com o modelo HSSM. Isto ocorreu porque os argilominerais expansivos do solo não interagem eletricamente com fluidos apolares, de baixa constante dielétrica (2,2), como no caso do OMI. De forma contrária, a água, como substância polar, possui constante dielétrica elevada (80), refletindo em uma forte interação com o solo argiloso, ocasionando sua retenção no meio poroso. Os resultados obtidos corroboram com os resultados obtidos por Machado *et al.* (2016), Cardoso (2011), Amorim Júnior (2007) e Oliveira (2001)

Apesar da constante dielétrica dos fluidos exercer uma influência significativa sobre a infiltração em solos argilosos expansivos, outras variáveis podem ser mais relevantes no processo de infiltração. A análise de sensibilidade do algoritmo proposto, por meio da metodologia *Bootstrap*, indicou que as variáveis mais importantes no processo de infiltração são: saturação de água, saturação residual de óleo, porosidade, altura da lâmina de LNAPL na superfície, condutividade hidráulica à água, índice de plasticidade e saturação residual da água, respectivamente. Por exemplo, no caso de um solo argiloso expansivo, com elevada saturação de água, a infiltração do OMI será reduzida ou não ocorrerá.

No desenvolvimento do presente estudo, foi verificado que muitas subestações de energia elétrica são construídas sobre embasamento de material argiloso natural ou sobre aterro. Desta forma, é de fundamental importância que a modelagem matemática de vazamentos de OMI leve em consideração a influência da constante dielétrica sobre a migração vertical dos fluidos apolares, sob pena de subestimar os impactos nos solos argilosos. Isso se torna ainda mais importante considerando o fato que os procedimentos de simulação matemática preventiva devem sempre considerar os cenários mais críticos. Essas recomendações também podem ser estendidas aos empreendimentos industriais ou comerciais que armazenam ou transportam substâncias químicas apolares e que, no contexto do planejamento de ações de contingenciamento ambiental, se utilizem de modelos matemáticos de previsão de vazamentos.

7. Recomendações

Com base nas conclusões obtidas neste trabalho recomenda-se:

- a) Elaborar experimentos de infiltração com óleo mineral isolante em colunas, para obtenção das taxas de infiltração em solos com diferentes índices de plasticidade, associados às frações de argilominerais expansivos constituintes do meio poroso.
- b) Com base nos resultados do modelo físico, realizar a validação do algoritmo proposto e verificar a necessidade de aprimoramento do algoritmo proposto.
- c) Desenvolver um modelo de redistribuição da fase livre oleosa após a extinção do termo fonte (lâmina de óleo na superfície do solo).

8. Referência Bibliográfica

ABNT. **NBR 6.856 - Especificações e ensaios em transformador de corrente.**, 2015a.

ABNT. **NBR 13.231-Proteção contra incêndio em subestações elétricas**, 2015b.

ABNT. **NBR 7180 - Solo- Determinação do limite de plasticidade**, 2016.

ABNT. **NBR 10576 - Óleo mineral isolante de equipamentos elétricos - Diretrizes para a supervisão e manutenção**, 2017.

ABRADEE. **Visão geral do setor.** Disponível em: <<http://www.abradee.com.br/setor-eletrico/visao-geral-do-setor>>.

AMORIM JUNIOR, Carlos José. **Avaliação dos critérios de impermeabilização de bacias de contenção da norma ABNT NBR 17505-2/2006 para terminais de armazenamento de petróleo e derivados.** 2007. 127 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

ANEEL, A. N. D. E. E. **Manual de fiscalização da transmissão 2004. Manual de fiscalização da transmissão 2004**, p. 274, 2004.

ANEEL, A. N. D. E. E. **Relatório de Análise - Desligamentos Forçados do Sistema de Transmissão.** 2017. p.633 Agência Nacional de Energia Elétrica, 2017.

ANP, AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO. **Resolução ANP nº 36, de 13.11.2007**, 2007.

ASTM. Standard Specification for Mineral Insulating Oil Used in Electrical Apparatus 1. **Significance**, v. 88, n. August 1988, p. 1–7, 2001.

ASTM. D5447-17 Standard Guide for Application of a Numerical Ground-water Flow Model to a Site-Specific Problem. v. 04, p. 4–10, 2017.

ASTM. D5981 Standard Guide for Calibrating a Ground-Water Flow Model Application. v. 96, p. 1–7, 2018.

BEAR AND CHENG. **Modeling Groundwater Flow and Contaminant Transport**. v. 53. p.160. 2010.

BEAR, J. **Dynamics of fluids in porous média**. p.763. 1988.

BECHARA, R. **Análise de falhas de transformadores de potência**. p.118
Universidade de São Paulo, 2010.

BEDIENT, P. B.; RIFAI, H. S.; NEWELL, C. J. **Groundwater Contamination: Transport and Remediation**. p.462. 1994.

BROOKS, R. H.; COREY, A T. Hydraulic properties of porous media. **Hydrology Papers, Colorado State University. Fort Collins CO**, v. 3, n. 3, p. 27, 1964.

BUDHU, M. et al. The permeability of soils with organic fluids. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 28, n. 1, p. 140–147, 1991.

BURDINE, N. T. Relative permeability calculations from pore size distribution data. **Transactions American Institute of Mining Engineers**, v. 198, p. 71–78, 1953.

CARDOSO, L. DA SILVA PAES. **Estudo do transporte de poluentes imiscíveis em solo**. 2010. 152 f. Tese (Doutorado) - Curso de Energia e Ambiente, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2010.

CELIA, M.; BOULOUTAS, E. T.; ZARBA, R. L. A general mass-conservative numerical solution for the unsaturated flow equation. **Water Resources Research**, v. 26, n. 1, p. 1483–1496, 1990.

CHARBENEAU, R. J. **The Hydrocarbon spill screening model (HSSM): theoretical background and source codes**, 1995.

CORP, S. E. **Operating instructions - Guelph Permeameter Model 2800K1**. p.55. 2008.

CORSEUIL, H. X.; AMORIM JÚNIOR, C. J.; COELHO, J. I. **Avaliação da eficiência de impermeabilização de bacias de contenção em terminais de armazenamento de petróleo e derivados**. Primeira ed. p. 159. (No prelo)

DAS, B. M. **Fundamentos de Engenharia Geotécnica**. p.159. 2011.

EMBRAPA. **Manual de métodos e análises de solo**. p.212. 1997.

FRIEDENBERG, L. E.; SANTANA, R. M. C. Propriedades de óleos isolantes de transformadores e a proteção do meio ambiente. **IX Simpósio Internacional de Qualidade Ambiental**, p. 1–15, 2014.

GINEVAN, M. E.; SPLITSTONE, D. E.; CRC, H. **Statistical Tools for Environmental Quality Measurement**. [s.l: s.n.].

GREEN, W. H.; AMPT, G. A. The theory of air and water through soils Title. **Journal Agric. Science**, v. 4, p. 1–24, 1911.

GRIM, R. E. **Clay Mineralogy**. 2004..

HODNETT, M. G.; TOMASELLA, J. Marked differences between van Genuchten soil water-retention parameters for temperate and tropical soils: A new water-retention pedo-transfer functions developed for tropical soils. **Geoderma**, v. 108, n. 3–4, p. 155–180, 2002.

HSU, S.-Y.; HILPERT, M. Incorporation of Dynamic Capillary Pressure into the Green–Ampt Model for Infiltration. **Vadose Zone Journal**, v. 10, n. 2, p. 642, 2011.

HUSEIN MALKAWI, A. I.; ALAWNEH, A. S.; ABU-SAFAQAH, O. T. Effects of organic matter on the physical and the physicochemical properties of an illitic soil. **Applied Clay Science**, v. 14, n. 5–6, p. 257–278, 1999.

HUSSEIN, M.; JIN, M.; WEAVER, J. W. Development and verification of a screening model for surface spreading of petroleum. **Journal of Contaminant Hydrology**, v. 57, n. 3–4, p. 281–302, 2002.

ITCG. **Argila**. Disponível em:
<<http://www.mineropar.pr.gov.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=29%3E Acesso>>.

KELLER, T.; DEXTER, A. R. Plastic limits of agricultural soils as functions of soil texture and organic matter content. **Soil Research**, v. 50, n. 1, p. 7, 2012.

KOHTOH, M. et al. Transformer insulating oil characteristic changes observed using accelerated degradation in consideration of field transformer conditions. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, v. 17, n. 3, p. 808–818, 2010.

KRAUSKPOF, K. B. **Introdução a Geoquímica II**. p.294. 1972.

LENHARD, R. J.; PARKER, J. C.; MISHRA, S. On the Correspondence between Brooks- Corey and van Genuchten Models. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 115, n. 4, p. 744–751, 1989.

LEVERETT, M. C. Capillary Behavior in Porous Solids. **Transactions of the AIME**, v. 142, n. 01, p. 152–169, 1941.

LIBARDI, P. L. Dinâmica da água no solo. p. 344, 2005.

LOS ANGELES LNAPL WORKING GROUPE. Light Non-Aqueous Phase Liquids (LNAPL) Literature Review Vesion 1.0. **Los Angeles LNAPL Working Group**, p. 75, 2011.

MACHADO, S. L. et al. Modeling Soil Permeability When Percolated by Different Soil. **Transport in Porous Média**, v. 111, n. 3, p. 763–793, 2016.

MANLY, B. F. J.; CRC, H. **Statistics for Environmental Science and Management**. p.323. 2001.

MARTINS, M. Vegetable oils, an alternative to mineral oil for power transformers- experimental study of paper aging in vegetable oil versus mineral oil. **IEEE Electrical Insulation Magazine**, v. 26, n. 6, p. 7–13, 2010.

MERCER, J. W.; COHEN, R. M. A review of immiscible fluids in the sub-surface: Properties, models, characterization and remediation. **Journal of Contaminant Hydrology**, v. 6, n. 2, p. 107–163, 1990.

NEWELL, C. J. et al. **Ground Water Issue**. p.25. 1992.

NUTTING, P. G. Physical analysis of oil sands. **Am. Assoc. Petrol.Geol**, v. 14, p. 1337–1349, 1934.

OLIVEIRA, J. C. S. **Contaminação de sedimentos argilosos por combustíveis automotivos: problema de avaliação da permeabilidade.** 2010. 129 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciências Geológicas, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2010

PELLICHERO, E. et al. Dynamic capillary pressure during water infiltration: Experiments and Green-Ampt modeling. **Water Resources Research**, v. 48, n. 6, p. 1–6, 2012.

PETROBRAS. **Ficha De Informações De Segurança De Produtos Químicos - FISPQ**, 2015.

PIZARRO, M. DE L. P. **Simulação de fluxo de água e transporte de solutos na zona não-saturada do solo pelo método de elementos finitos adaptativo.** Universidade de São Paulo, 2009.

RAJAB, A.; SULAEMAN, A.; SUDIRHAM, S. A Comparison of Dielectric Properties of Palm Oil with Mineral and Synthetic Types Insulating Liquid under Temperature Variation. **ITB J. Eng. Sci**, v. 43, n. 3, p. 191–208, 2011.

REHMAN, C. A. et al. Insulating Fluids for Power Transformers Properties. **International Journal of Technical Research and Applications** www.ijtra.com Special IssueKCCEMSR), v. 39, n. 39, p. 2320–8163, 2016.

REIBLE, D. D. et al. Infiltration of immiscible contaminants in the unsaturated zone. 1990.

SANTOS, R. D. DO et al. Manual de Descrição e Coleta de Solos no Campo. **Journal of Chemical Information and Modeling**, p. 100, 2005.

SILVA, C. R. et al. Caracterização físico-química e dielétrica de óleos biodegradáveis para transformadores elétricos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n. 2, p. 229–234, 2012.

TOMASELLA, J.; HODNETT, M. Pedotransfer functions for tropical soils. **Developments in Soil Science**, v. 30, n. C, p. 415–429, 2004.

TOMLINSON, D. W. et al. Understanding complex LNAPL sites: Illustrated handbook of LNAPL transport and fate in the subsurface. **Journal of Environmental Management**, v. 204, p. 748–756, 2017.

TRAUTH, M. H. **MATLAB Recipes for Earth Sciences**. p.436. 2015

UETA, G. et al. Study on degradation causing components of various characteristics of transformer insulating oil. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, v. 19, n. 6, p. 2216–2224, 2012.

VAN GENUCHTEN, M. T. **Closed-Form Equation for Predicting The Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils**. 1980.

WADA, L. M. **Estudo do Comportamento de Solos Contaminados com Óleo de Isolamento de Transformadores**. 2011. 90 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011

WEAVER, J. W.; CHARBENEAU, R. J. The Hydrocarbon Spill Screening Model (HSSM) Volume 1: User's Guide. **U.S.E.P.A Publication**, v. EPA/600/R-, p. 1–229, 1994.

WEAVER, J. W.; CHARBENEAU, R. J.; LIEN, B. K. A screening model for nonaqueous phase liquid transport in the vadose zone using Green-Ampt and kinematic wave theory. **Water Resources Research**, v. 30, n. 1, p. 93–105, 1994.

WENDLAND, E.; PIZZARRO, MARIA L. P. Modelagem Computacional Do Fluxo Unidimensional De Água Em Meio Não Saturado Do Solo. **Engenharia Agricola**, v. 30, n. 3, p. 424–434, 2010.

XU, Z. et al. Transport and biodegradation modeling of gasoline spills in soil – aquifer system. **Environmental Earth Sciences**, p. 2871–2882, 2015.

YOON, H. et al. An environmental screening model to assess the consequences to soil and groundwater from railroad-tank-car spills of light non-aqueous phase liquids. **Journal of Hazardous Materials**, v. 165, n. 1–3, p. 332–344, 2009.

ZIRBES, R.; ROLIM, J. G.; ZÜRN, H. H. Metodologias para avaliação e diagnóstico do estado de isolamentos de papel impregnado com óleo mineral. **Sba: Controle & Automação Sociedade Brasileira de Automatica**, v. 16, n. 3, 2005.

Anexo 1: Perturbações em transformadores nas subestações elétricas e linhas de transmissão.

Subestações elétricas			
Data e Horário	Equipamento desligado	Descrição do local	Descrição da causa
28/08/2015 00:23	TR 345 / 138 kV ADRIANOPOLIS 2B RJ	Transformador de Corrente	Erro de Relação
06/02/2016 21:41	TR 345 / 138 kV ADRIANOPOLIS 2B RJ	Transformador de Corrente	Curto-Circuito - Secundário AC
07/09/2015 13:25	TR 345 / 230 kV BANDEIRANTES 1 GO	Transformador Regulador	Explosão
25/11/2015 06:23	BC 345 kV 150 MVar SAMAMBAIA 4 DF	Transformador de Potencial	Erro de Fiação AC - Execução
26/11/2015 03:22	BC 345 kV 150 MVar SAMAMBAIA 4 DF	Transformador de Potencial	Erro de Fiação AC - Execução
25/04/2016 07:13	TR 345 / 138 kV SA- MAMBAIA 6 DF	Transformador de Corrente	Erro de Fiação DC - Execução
18/02/2016 21:38	SB 345 kV TIJUCO PRETO B1 SP Tran	Transformador de Corrente	Explosão
18/02/2016 21:38	SB 345 kV TIJUCO PRETO B2 SP Tran	Transformador de Corrente	Explosão
22/7/16 11:34	CS 300 / -180 MVar TIJUCO PRETO 1 SP	Transformador de Interligação Externo	Ocorrência em outro Componente
04/02/2016 20:58	BS 500 kV 107 MVar S. DA MESA 1 GO	Transformador de Corrente	Defeito
10/02/2016 17:42	TR 230 / 138 kV S. DA MESA 6 GO	Transformador de Corrente	Erro de Relação
17/02/2016 12:58	BS 500 kV 107 MVar S. DA MESA 1 GO	Transformador de Corrente	Defeito
17/02/2016 13:06	BS 500 kV 107 MVar S. DA MESA 1 GO	Transformador de Corrente	Falha
17/02/2016 14:06	BS 500 kV 107 MVar S. DA MESA 1 GO	Transformador de Corrente	Falha
26/02/2016 10:32	BS 500 kV 107 MVar S. DA MESA 1 GO	Transformador de Corrente	Falha
04/04/2016 16:04	TR 230 / 138 kV S. DA MESA 6 GO	Transformador de Corrente	Erro de Relação
08/09/2015 21:16	TR 230 / 138 kV RU- ROPOLIS 2 PA	Transformador de Potencial	Mau contato fiação AC/DC
08/09/2015	TR 230 / 138 kV RU-	Transformador	Mau contato fiação

22:17	ROPOLIS 2 PA	de Potencial	AC/DC
09/09/2015 22:20	TR 230 / 138 kV RU- ROPOLIS 2 PA	Transformador de Potencial	Mau contato fiação AC/DC
10/09/2015 22:40	TR 230 / 138 kV RU- ROPOLIS 2 PA	Transformador de Potencial	Mau contato fiação AC/DC
15/09/2015 09:52	TR 230 / 138 kV RU- ROPOLIS 2 PA	Transformador de Corrente	Saturação (TC ou N
08/10/2015 09:09	TR 230 / 138 kV RU- ROPOLIS 3 PA	Transformador de Corrente	Erro de Fiação AC - Execução
30/10/2015 14:02	2 TR 230 / 138 kV RUROPOLIS 3 PA	Transformador de Potencial	Falha
04/11/2015 18:28	TR 230 / 138 kV RU- ROPOLIS 3 PA	Transformador de Potencial	Defeito
08/09/2015 21:16	TR 230 / 138 kV RU- ROPOLIS 2 PA	Transformador de Potencial	Mau contato fiação AC/DC 44 MW
08/09/2015 22:17	TR 230 / 138 kV RU- ROPOLIS 2 PA	Transformador de Potencial	Mau contato fiação AC/DC 43 MW
09/09/2015 22:20	TR 230 / 138 kV RU- ROPOLIS 2 PA	Transformador de Potencial	Mau contato fiação AC/DC 44 MW
10/09/2015 22:40	TR 230 / 138 kV RU- ROPOLIS 2 PA	Transformador de Potencial	Mau contato fiação AC/DC 40 MW
15/09/2015 09:52	TR 230 / 138 kV RU- ROPOLIS 2 PA	Transformador de Corrente	Saturação (TC ou Núcleo de Trafo) 32 MW
08/10/2015 09:09	TR 230 / 138 kV RU- ROPOLIS 3 PA	Transformador de Corrente	Erro de Fiação AC - Execução 0,00
30/10/2015 14:02	2 TR 230 / 138 kV RUROPOLIS 3 PA	Transformador de Potencial	Falha 69,93
04/11/2015 18:28	TR 230 / 138 kV RU- ROPOLIS 3 PA	Transformador de Potencial	Defeito 75 MW
20/05/2016 17:14	BS 500 kV 428 MVar ITACAIUNAS 1 PA	Transformador de Corrente	Outras - Proteção, Medição, Controle
18/11/2015 10:03	9 CE 300 / -200 MVar B. DESPACHO 3	1 MG Transformador de Corre	Curto-Circuito - Secundário AC
Linhas de Transmissão			
Data e Horário	Descrição do local	Descrição da causa	Descrição da natureza elétrica
1 31/8/15 8:13	Transformador de Potencial	Explosão	Sem Natureza Elétrica
10/07/2015 01:28	Transformador de Força	Erro de Conf. Lógica	Concepção Fase- Terra
26/06/2016 01:12	Transformador de Corrente	Explosão	Fase-Terra
20/10/2015 01:48	Transformador de Corrente	Explosão	Fase-Terra

02/03/2016 08:15	Transformador de Corrente	Explosão	Fase-Terra
29/08/2015 14:55	Transformador de Corrente	Explosão	Fase-Terra
19/03/2016 09:21	Transformador de Corrente	Explosão	Fase-Terra

FONTE: Adaptado de ANEEL (2017)

