

UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
ESCOLA POLITÉCNICA
MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL

FERNANDO ANTONIO LEITE VIEIRA LIMA

TRANSPORTE DE CONTAMINANTES ORIUNDOS DA ÁGUA DE
PRODUÇÃO DA INDÚSTRIA PETROLÍFERA EM SOLOS ARENO-
ARGILOSOS COMPACTADOS

Salvador

2018

UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
ESCOLA POLITÉCNICA
MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL

TRANSPORTE DE CONTAMINANTES ORIUNDOS DA ÁGUA DE
PRODUÇÃO DA INDÚSTRIA PETROLÍFERA EM SOLOS ARENO-
ARGILOSOS COMPACTADOS

FERNANDO ANTONIO LEITE VIEIRA LIMA

Dissertação apresentada ao Mestrado em Engenharia
Civil, Escola Politécnica da Universidade Federal da
Bahia, como requisito para a obtenção do grau de
Mestre.

Orientador: Prof. Dr. Sandro Lemos Machado

Projeto Financiado pela PETROBRAS S.A.

Salvador

2018

Vieira Lima, Fernando Antonio Leite

Transporte de Contaminantes Oriundos da Água de Produção da Indústria Petrolífera em Solos Areno-Argilosos Compactados / Fernando Antonio Leite Vieira Lima. -- Salvador, 2018.
222 f.

Orientador: Sandro Lemos Machado.

Dissertação (Mestrado – Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal da Bahia, Escola Politécnica, 2018.

1. Ensaio de Coluna. 2. Hidrocarbonetos. 3. Migração de Contaminantes. 4. Biodegradação. 5. Redução de Condutividade Hidráulica. I. Machado, Sandro Lemos . II. Título.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a minha companheira da vida, Cristina Toca Pérez, que me dá o apoio necessário em todos os momentos e que me incentivou à candidatura ao mestrado, mesmo quando eu não estava confiante.

FORMAÇÃO DO CANDIDATO

Engenheiro Civil, formado pela Universidade Federal da Bahia (2012).

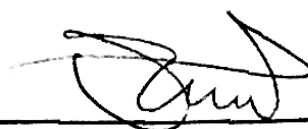
“O relógio de vida recebe corda apenas uma vez
E nenhum homem tem o poder de decidir quando os ponteiros
pararão, se mais cedo ou mais tarde.
Agora é o único tempo que você possui.
Viva, ame e trabalhe com vontade.
Não ponha nenhuma esperança no tempo, pois o relógio pode parar a qualquer
momento.”

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE

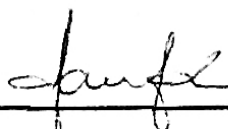
FERNANDO ANTONIO LEITE VIEIRA LIMA

APRESENTADA AO MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL DA UNIVERSIDADE
FEDERAL DA BAHIA, EM 10 DE AGOSTO DE 2018

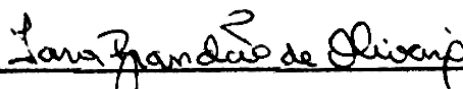
BANCA EXAMINADORA



Prof.(a) Dr.(a) **Sandro Lemos Machado**
Orientador
PPEC - UFBA



Prof.(a) Dr.(a) **Paulo César Lodi**
PPG - UNESP



Prof.(a) Dr.(a) **Lara Brandão de Oliveira**
PECC - UFBA

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, ao Grande Arquiteto do Universo pela vida e por todas as oportunidades que me tem dado, colocando as pessoas certas no meu caminho e me dando sabedoria para que tome as decisões corretas.

Agradeço a toda minha família, em especial ao meu pai, Fernando Antonio, e a minha mãe, Regina, por sempre se sacrificarem por mim e minha irmã, dando-nos todas as ferramentas necessárias para o nosso desenvolvimento. Agradeço pela educação moral que me foi dada, pois essa dificilmente se aprende na escola. Agradeço por me haver ensinado que dar o meu melhor não é “mais do que a minha obrigação”. Agradeço também, em especial, à minha avó Jujú por tantas orações dedicadas ao meu sucesso!

Agradeço a minha namorada, noiva, esposa, amiga, companheira da vida, Cristina, pelo apoio diário na minha caminhada e por ser minha alma gêmea. Como sempre dizemos, “a maior satisfação na luta do dia a dia é chegar na *casuca* e compartilhar nossas vitórias”. Sem ela, os êxitos não teriam o mesmo sabor!

Ao professor Sandro Lemos Machado, o meu mentor acadêmico, pela paciência, compreensão, dedicação na minha orientação e por ser um grande exemplo de profissional e pessoa.

Às professoras Miriam Carvalho e Iara Oliveira pelas decisivas contribuições para a elaboração deste trabalho nas bancas preliminares.

Aos colegas do GEOAMB, Adriano, Antônio, Átila, Bruno, Gustavo, Guilherme, Jeová, José Domingos, Larissa, Leandro, Nicole, Ramile, Raul, Ricardo, Zenite, pela convivência, colaboração, apoio nos ensaios deste trabalho e disposição para ajudar sempre que foi preciso.

Ao meu encarregado Jorge de Souza Batista por ser os meus olhos nas obras nos momentos que não estava presente em função da elaboração deste trabalho. Às minhas estagiárias, Camile e Clara, por todo o apoio dado na minha empresa neste período.

À Petróleo Brasileiro S.A. pelo financiamento deste projeto e parceria com o GEOAMB apoiando o desenvolvimento científico do nosso país.

A todos os contribuintes do Estado Brasileiro que, direta ou indiretamente, arcaram com os custos do meu mestrado.

Muito obrigado a todos por fazerem parte da minha vida neste momento! Podem ter certeza que foi dado o máximo neste trabalho!

RESUMO

Este trabalho apresenta o uso de ensaios de coluna realizados em amostras compactadas em três diferentes solos (denominados como Vermelho, Várzea e Piçarra), sob diferentes condições de compactação para avaliar o seu desempenho na contenção da água de produção de poços de produção “*on shore*”. A eficácia de uma bacia de contenção, na ocorrência de uma eventual disponibilização dos produtos estocados, é função de seus parâmetros hidráulicos em condições de saturação ou não, os quais podem variar em decorrência de mudanças físico-químicas na estrutura do solo, e de fenômenos como dispersão, formação de biofilme e colmatção de poros. O programa experimental consistiu em realizar ensaios de coluna monitorada com tensiômetros e sondas FDR para a determinação simultânea dos parâmetros de fluxo (condutividade hidráulica saturada e não saturada) e de transporte de contaminantes (coeficiente de dispersão hidrodinâmica, fator retardamento, constante de decaimento). Nestes ensaios foram empregada a técnica do perfil Instantâneo para determinação de curva de condutividade hidráulica e através da análise química dos efluentes foi possível a modelagem da migração dos hidrocarbonetos bem como o entendimento das trocas catiônicas durante a percolação (pela variação na concentração dos cátions) . Os solos estudados são provenientes da zona de produção de petróleo *onshore* da PETROBRAS/UO-RNCE e são classificados pela SUCS como SC, sendo compactados com diferentes energias para a realização dos ensaios. Na maioria dos ensaios, houve redução da permeabilidade saturada com o decorrer do tempo, em função dos fenômenos descritos acima. As curvas de retenção e condutividade hidráulica obtidas para os solos Vermelho, Várzea e Piçarra através do método do perfil instantâneo apresentaram resultados condizentes com os valores obtidos pelo método preditivo de van Genuchten (1980). Foi verificada a ocorrência de degradação dos contaminantes orgânicos pelos microrganismos presentes no solo Várzea. Para realizar a modelagem da Curva de Chegada, neste caso, foi sugerido um novo método onde foram adaptadas equações existentes na literatura, gerando resultados mais condizentes com os resultados experimentais obtidos nos três ensaios de coluna. Também foi analisado o fenômeno de redução de k durante a percolação, discutindo as hipóteses para a ocorrência deste fenômeno e as consequência na migração dos contaminantes. O efeito do aumento da energia de compactação foi discutido a partir dos resultados experimentais obtidos a partir dos ensaios utilizando o

solo Piçarra. Esta dissertação possibilitou a obtenção de parâmetros que podem auxiliar na tomada de decisões por parte das empresas do ramo da produção de petróleo, tanto na construção das bacias de contenção mais econômicas e seguras quanto nas medidas mitigadoras a serem tomadas na ocorrência de vazamentos durante a extração ou armazenamento da água de produção. O ensaio de coluna monitorada se mostrou bastante útil na determinação dos parâmetros hidráulicos e de transporte de contaminantes. As hipóteses para redução de k por obstrução por dispersão da argila e filtração de orgânicos em suspensão foram validadas enquanto a hipótese de redução por atividade microbiana foi constatada como pouco efetiva.

Palavras-chave: Ensaio de Coluna; Hidrocarbonetos; Migração de Contaminantes; Biodegradação, Redução de Condutividade Hidráulica, Dispersão da Argila, Filtração de Orgânicos

ABSTRACT

This work presents the use of column tests carried out on compacted samples using three different soils (denominated as Vermelho, Várzea and Piçarra), under different compaction conditions to evaluate their performance in the containment of production water from on shore production. The effectiveness of a containment basin, in the event of a possible availability of the stored products, is a function of its hydraulic parameters under saturation or non-saturation conditions, which may vary due to physical-chemical changes in the soil structure, and phenomena such as dispersion, biofilm formation and pore clogging. The experimental program consisted of conducting monitored column tests with tensiometers and FDR probes for the simultaneous determination of flow parameters (saturated and unsaturated hydraulic conductivity) and transport of contaminants (hydrodynamic dispersion coefficient, retardation factors, decay constant). In these tests, the instantaneous profile technique was used to determine the hydraulic conductivity curve and through the chemical analysis of the effluents it was possible to model hydrocarbon migration as well as the understanding of the cation exchange during percolation (by the change in cations concentration). The soils studied come from the PETROBRAS / UO-RNCE onshore oil production zone and are classified by USCS as SC, being compacted with different energies to carry out the tests. In the majority of the tests, there was a reduction of saturated permeability over time, due to the phenomena described above. The retention and hydraulic conductivity curves obtained for the soils Vermelho, Várzea and Piçarra using the instantaneous profile method presented results consistent with the values obtained by the van Genuchten (1980) predictive method. It was verified the occurrence of degradation of the organic contaminants by the microorganisms present in the Várzea soil. To accomplish the modeling of the Breakthrough curve, in this case, a new method has been suggested which have been adapted equations existing in the literature, generating more consistent results with the experimental results obtained in the three column tests. It was also analyzed the phenomenon of reduction of k during percolation, discussing the hypotheses for the occurrence of this phenomenon and the consequence in the migration of the contaminants. The effect of increasing the compaction energy was discussed from the experimental results obtained from the tests using the Piçarra soil. This dissertation made it possible to obtain parameters that can help decision making by

companies in the oil production sector, both in the construction of the most economical and safe containment basins and in the mitigation measures to be taken in the event of leaks during extraction or storage of production water. The monitored column test proved to be very useful in the determination of hydraulic parameters and transport of contaminants. The hypotheses for reduction of k by clay dispersion obstruction and filtration of suspended organic matter were validated while the hypothesis of reduction by microbial activity was found to be ineffective.

Keywords: Column test; Hydrocarbons; Migration of Contaminants; Biodegradation, Reduction of Hydraulic Conductivity ; Clay Dispersion, Organic Filtration

SUMÁRIO

BANCA EXAMINADORA.....	viii
AGRADECIMENTOS.....	x
RESUMO.....	xii
ABSTRACT.....	xiv
SUMÁRIO.....	xvi
ÍNDICE DE TABELAS.....	xix
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xxi
ÍNDICE DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS.....	xxix
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA.....	3
3. OBJETIVOS DE PESQUISA.....	4
3.1. Geral.....	4
3.2. Específicos.....	4
4. REVISÃO DE LITERATURA.....	5
4.1. Água de Produção de Petróleo.....	5
4.1.1. Principais Componentes.....	5
4.2. Potenciais da água nos Solos.....	7
4.3. Propriedades Hidráulicas de Solos Saturados.....	10
4.3.1. Condutividade Hidráulica em Meio Saturados.....	10
4.3.2. Redução da Condutividade Hidráulica Durante Percolação.....	15
4.4. Propriedades Hidráulicas de Solos Não Saturados.....	25
4.4.1. Curva de retenção.....	25
4.4.2. Condutividade Hidráulica em Meio Não Saturados.....	34
4.5. Mecanismos do Transporte de Solutos em Solos.....	40
4.5.1. Processos Físicos.....	40
4.5.2. Processos Bio-físico-químicos.....	46
4.5.3. Ensaio de Coluna.....	53
4.5.4. Soluções Analíticas para Migração de Contaminantes.....	53
5. METODOLOGIA DE PESQUISA.....	56
5.1. Desenvolvimento Experimental.....	59
5.1.1. Solos Utilizados.....	59

Caracterização Física do Solo.....	64
Caracterização Mineralógica dos Solos.....	69
Caracterização Físico-química dos Solos.....	71
5.1.2. Fluidos Utilizados.....	72
Caracterização Física dos Fluidos.....	73
Caracterização Físico-química dos Fluidos.....	76
5.1.3. Ensaio de Coluna Monitorada.....	79
5.1.4. Ensaio Complementares.....	110
5.2. Modelagem Numérica.....	122
5.2.1. Calibração da Curva de Condutividade Hidráulica.....	122
5.2.2. Simulações de Vazamentos em Campo.....	124
6. ANÁLISE DOS RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	128
6.1. Condutividade Hidráulica Saturada do Solo Piçarra em função da energia de compactação.....	128
6.2. Condutividade Hidráulica Saturada dos solos Vermelho e Várzea.....	130
6.3. Condutividade Hidráulica em Ensaio de Coluna Monitorada.....	131
6.4. Curvas de Retenção.....	137
6.5. Curvas de Chegada.....	141
6.6. Atividade microbiana.....	149
6.7. Avaliação de Hipóteses para Diminuição da Condutividade nos Ensaio de Coluna.....	150
6.7.1. Verificação da hipótese de Obstrução dos Poros por Dispersão da Argila. .	150
6.7.2. Verificação da hipótese de obstrução dos Poros por Filtração dos Orgânicos	165
6.7.3. Verificação da hipótese de obstrução dos Poros por Atividade Microbiana	170
6.8. Monitoramento da Infiltração.....	172
6.8.1. Perfis de Infiltração.....	172
6.8.2. Curvas de retenção (Ensaio de Coluna).....	181
6.8.3. Curva de Condutividade Hidráulica.....	183
6.9. Modelagem.....	187
6.9.1. Calibração da Curva de Condutividade Hidráulica.....	187
6.9.2. Simulações de Vazamentos em Campo.....	196
7. 7. CONCLUSÕES.....	207
7.1. Ensaio de Coluna Monitorada.....	207

7.2. Modelagem da Migração de Contaminantes.....	207
7.3. Redução de Condutividade Hidráulica em Solos Arenó-argilosos.....	208
7.3.1. Redução de Condutividade Por Dispersão da Argila.....	208
7.3.2. Redução de Condutividade Por Filtração dos Orgânicos.....	209
7.3.3. Redução de Condutividade Por Atividade Microbiana.....	209
7.4. Modelagem Numérica de Vazamento em Campo.....	209
8. REFERÊNCIAS.....	211

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 4.1 Composição de Cátions e Ânion em águas (g/L).....	5
Tabela 4.2: Faixa de Variação da Sucção de Entrada de Ar.....	26
Tabela 4.3: Técnicas de medição de sucção.....	31
Tabela 4.4: Métodos para determinação da função de condutividade hidráulica.....	36
Tabela 4.5: Equações do Modelos para determinação da função de condutividade hidráulica.....	37
Tabela 5.1 : Granulometria, Índices de Consistência, Massa Específica dos Sólidos e Classificação.....	63
Tabela 5.2: Resultados de Ensaios de Compactação.....	66
Tabela 5.3: FRX - Concentração dos Principais Elementos.....	68
Tabela 5.4: DRX - Concentração dos Principais Compostos.....	68
Tabela 5.5: Quantidade de Sólidos Totais Voláteis.....	70
Tabela 5.6: Viscosidade dos Fluidos.....	73
Tabela 5.7: Massa Específica dos Fluidos.....	73
Tabela 5.8: Concentração de HTP, CE e pH.....	74
Tabela 5.9: Concentração de Cátions e Salinidade.....	75
Tabela 5.10: Precisão e Resolução das Sondas TDR MP306.....	87
Tabela 5.11: Precisão de Sonda 5TE - Sensor de Umidade, CE e Temperatura do solo.	89
Tabela 5.12: Precisão de Sonda MPS-6 – Potencial Hidráulico e Temperatura do solo.	90
Tabela 5.13: Especificações de Compactação dos Corpos de Prova.....	92
Tabela 5.14: Índices físicos dos CPs dos Ensaios de Coluna Monitorada.....	95
Tabela 5.15: Informações dos CPs do Solo Piçarra da Primeira Bateria de Ensaios.....	107
Tabela 5.16: Informações dos CPs Solo Piçarra da Segunda Bateria de Ensaios.....	108
Tabela 5.17: Especificações de Compactação dos Corpos de Prova para Permeâmetro Flexível.....	110
Tabela 5.18: Informações dos CPs utilizados nos Ensaios com Permeâmetro Flexível	111
Tabela 5.19: Precisão e Amplitude do Equipamento WP4C Dewpoint Potencia Meter	115
Tabela 6.1: Configuração dos CPs Solo Piçarra da Segunda Bateria de Ensaios e respectivos coeficientes de permeabilidade saturada.....	124

Tabela 6.2: Energia de Compactação Calculada para CPs de Solo Piçarra a partir de regressão linear.....	125
Tabela 6.3: Índices físicos dos CPs dos solos Vermelho e Várzea e respectivos valores de condutividade hidráulica saturada nos experimentos preliminares.....	126
Tabela 6.4: Condutividade Hidráulica medida inicialmente nos ensaios de coluna monitorada x condutividade hidráulica ensaios complementares.....	126
Tabela 6.5: Condutividades hidráulicas inicial, média e final e respectivos índices físicos.....	127
Tabela 6.6: Parâmetros da Curva de Retenção pelo Modelo de Van Genuchten (1980).....	133
Tabela 6.7: Parâmetros da Curva de Retenção pelo Modelo Duplo Van Genuchten (CADUCCI <i>et al.</i> , 2010).....	135
Tabela 6.8: Parâmetros da Modelagem da Curva de Chegada.....	137
Tabela 6.9: Cátions bivalentes liberados, SAR e Salinidade.....	152
Tabela 6.10: FRX - Concentração dos Principais Elementos.....	157
Tabela 6.11: Quantidade de Sólidos Totais Voláteis.....	160
Tabela 6.12: Variação de Condutividade Hidráulica nos Trechos 1 e 2.....	164
Tabela 6.13: Parâmetros da Curva de Condutividade Hidráulica pelo método de Van Genuchten (1980).....	180
Tabela 6.14: Volume de fluido e de HTP percolados pela base da camada de proteção da Bacia (Várzea).....	193
Tabela 6.15: Volume de fluido e de HTP percolados pela base da camada de proteção da Bacia (Piçarra).....	196
Tabela 6.16: Volume de fluido e de HTP percolados pela base da camada de proteção da Bacia (Vermelho).....	199
Tabela 6.17: Volume de fluido e de HTP percolados pela base da camada de proteção da Bacia (Vermelho).....	200

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 4.1: Água Capilar e de Adsorção.....	8
Figura 4.2: Desbalanceamento de Forças na Interface Líquido-gás.....	9
Figura 4.3: Formação de meniscos capilares.....	9
Figura 4.4: Esquema do ensaio de determinação da condutividade hidráulica com o método de carga constante.....	14
Figura 4.5: Esquema do ensaio de determinação da condutividade hidráulica com o método de carga variável.....	15
Figura 4.6: Influência geral da composição da água na perda de solo.....	18
Figura 4.7: Gráfico de Dispersão da Argila em relação à Concentração Eletrolítica para fluidos com diversos SAR.....	19
Figura 4.8: Esquema de mecanismos de filtração de partículas suspensas.....	20
Figura 4.9: Distribuição de tamanho de partícula para sedimentos em suspensão.....	22
Figura 4.10: Comparação do tamanho dos poros de xisto com o tamanho da molécula de hidrocarboneto.....	23
Figura 4.11: Condutividade hidráulica (k) de meios porosos antes e após o tratamento com bactérias.....	24
Figura 4.12: Curva de retenção típica – Solo Siltoso.....	26
Figura 4.13: Efeito da energia de compactação na curva de retenção.....	27
Figura 4.14: Histereses da curva de retenção (a) e efeito tinteiro atuante na histerese (b)	28
Figura 4.15: Função da condutividade para solo arenoso e argiloso.....	34
Figura 4.16: Representação conceitual do transporte de contaminante por advecção....	39
Figura 4.17: Representação conceitual do transporte de contaminante por dispersão....	40
Figura 4.18: Mecanismos de dispersão ou mistura mecânica, a) Mecanismos de dispersão ou mistura mecânica, b) dispersão em canais individuais, c) tortuosidade, reentrâncias e interligações.....	42
Figura 4.19: Isoterma linear, aproximação razoável para baixas concentrações de contaminante.....	47
Figura 4.20: Isoterma clássica de Adsorção mostrando os tipos de adsorção linear, de Langmuir e Alta Afinidade.....	48

Figura 4.21: Isoterma de Langmuir, a) Gráfico mostrando a adsorção como função da concentração, b) Gráfico utilizado para determinar os parâmetros.....	48
Figura 4.22: Equações de Degradação Biológica.....	50
Figura 5.1: Delineamento da pesquisa.....	54
Figura 5.2: Etapas do Desenvolvimento Experimental.....	56
Figura 5.3:- Foto ilustrativa da área 2.....	57
Figura 5.4 - Localização da Área 2.....	58
Figura 5.5: Solo coletado ao redor do oleoduto.....	58
Figura 5.6 - Aspecto do solo argiloso encontrado na margem de rio que cruza o oleoduto	59
Figura 5.7 - Foto ilustrativa da área 4.....	60
Figura 5.8 - Localização da Área 4.....	60
Figura 5.9 -Foto ilustrativa de vista da área de empréstimo localizada próxima a área 4.	61
Figura 5.10 - Foto de Solo Piçarra Coletado.....	61
Figura 5.11 – Curva Granulométrica dos Solo Vermelho, Várzea e Piçarra.....	64
Figura 5.12: Carta de Plasticidade dos Solos Vermelho, Várzea e Piçarra.....	65
Figura 5.13: Espectrômetro Portátil de FRX modelo X-MET 7500.....	67
Figura 5.14: Viscosímetro Digital DV2T.....	71
Figura 5.15: Dispositivo de Variação de Temperatura.....	72
Figura 5.16: Foto Cilindro Metálico e Paleta.....	72
Figura 5.17: Foto ilustrativa do banho térmico utilizado.....	72
Figura 5.18: Esquema gráfico do Equipamento do Ensaio de Coluna.....	77
Figura 5.19: Foto Reservatório de Mariotte.....	78
Figura 5.20: Foto Cilindro Metálico.....	78
Figura 5.21: Novo modelo de reservatório (desmontado).....	79
Figura 5.22: Cabeçote superior do reservatório com dispositivos de isolamento.....	80
Figura 5.23: Detalhe cabeçote inferior do reservatório, niple e adaptação do cabeçote superior da coluna.....	80
Figura 5.24: Detalhe do dreno lateral.....	81
Figura 5.25: Foto do interior Tubo PVC.....	81
Figura 5.26: Foto da vista interna do cabeçote superior e <i>o-rings</i>	82
Figura 5.27: Foto da vista interna do cabeçote inferior com geotêxtil.....	82

Figura 5.28: Cabeçote inferior e travamento (esquema inicial).....	83
Figura 5.29: Cabeçote inferior e travamento (esquema final).....	83
Figura 5.30: Peça guia/reservatório de entrada (equipamento inicial).....	84
Figura 5.31: Cabeçote superior definitivo.....	84
Figura 5.32: Posicionamento dos Tensiômetros e Sondas FDR.....	86
Figura 5.33: Sonda TDR MP306.....	87
Figura 5.34: Volume de Influência na Medição das Sondas 5TE.....	88
Figura 5.35: Sonda MPS-6.....	90
Figura 5.36: Colarinho superior de compactação e cabeçote inferior, fixados no corpo de prova.....	92
Figura 5.37: Vedação das Sondas.....	94
Figura 5.38: Abastecimento do Reservatório.....	95
Figura 5.39: Frasco de vidro para coleta de efluente.....	96
Figura 5.40: Efluente devidamente acondicionada.....	97
Figura 5.41 Esquema de determinação das curvas de retenção nos ensaios de coluna.	101
Figura 5.42: Métodos de Determinação de R_d	102
Figura 5.43: Extrapolação da Curva de Chegada para determinação de R_d para o caso dos ensaios com decaimento.....	103
Figura 5.44: Variação de valores de D_0 (cm^2/s) em função do número de carbonos equivalente.....	103
Figura 5.45: Permeâmetro Flexível.....	109
Figura 5.46: Sistema de Percolação.....	109
Figura 5.47: Base Metálica, Molde de PVC Bipartido e Abraçadeiras.....	110
Figura 5.48: Compactador de Bancada.....	110
Figura 5.49: Montagem do Ensaio de Permeabilidade com Permeâmetro Flexível.....	111
Figura 5.50: CPs posicionados na Câmara de Pressão para “saturação” por ascensão capilar.....	113
Figura 5.51: Câmara de Pressão vedada durante ensaio.....	113
Figura 5.52: Esquema gráfico do WP4C.....	114
Figura 5.53: Corpo de Prova.....	116
Figura 5.54: Cravador em moldagem do disco.....	116
Figura 5.55: Saída de Dados do Equipamento WP4C.....	117
Figura 5.56: Malha utilizada e Condições de Contorno (Tela Inicial).....	119

Figura 5.57: Malha utilizada e Condições de Contorno (Tela de Resultados).....	119
Figura 5.58: Malha utilizada e Condições de Contorno – Simulação Bacia SEEP/W..	121
Figura 5.59: Malha utilizada e Condições de Contorno – Simulação Bacia CTRAN/W	121
Figura 6.1: Energia de Compactação x Condutividade hidráulica saturada – Solos Piçarra.....	125
Figura 6.2: Variação de k ao longo do tempo – Solo Vermelho.....	128
Figura 6.3: Variação de k x volume de poros percolados – Solo Vermelho.....	128
Figura 6.4: Variação de k ao longo do tempo – Solo Várzea.....	129
Figura 6.5: Variação de k x volume de poros percolados – Solo Várzea.....	129
Figura 6.6: Variação de k ao longo do tempo – Solo Piçarra Proctor Intermediário e E = 9 kgf.cm/cm ³	130
Figura 6.7: Variação de k x volume de poros percolados – Solo Piçarra Proctor Intermediário e E = 9 kgf.cm/cm ³	130
Figura 6.8: Variação de k ao longo do tempo – Solo Piçarra Proctor Normal CP1.....	131
Figura 6.9: Variação de k x volume de poros – Solo Piçarra Proctor Normal CP1.....	131
Figura 6.10: Variação do fluxo no solo com o aumento da energia de compactação....	132
Figura 6.11: Solo Várzea (Proctor Normal) - Curvas de Retenção Modeladas a partir da Equação de Van Genuchten (1980).....	134
Figura 6.12: Solo Vermelho (Proctor Modificado) - Curvas de Retenção Modeladas a partir da Equação de Van Genuchten (1980).....	134
Figura 6.13: Solo Piçarra (PN) - Curvas de Retenção.....	135
Figura 6.14: Solo Piçarra (E = 9kgf.cm/cm ³) - Curvas de Retenção.....	136
Figura 6.15: Solo Piçarra (PI) - Curvas de Retenção.....	136
Figura 6.16: Curvas de Chegada C/C0 x Volume de Poros– Solo Piçarra CP1.....	138
Figura 6.17: Curvas de Chegada C/C0 x Volume de Poros– Solo Piçarra CP4.....	138
Figura 6.18: Curvas de Chegada C/C0 x Volume de Poros– Solo Piçarra CP8.....	139
Figura 6.19: Curvas de Chegada C/C0 x Volume de Poros– Solo Vermelho CP1.....	139
Figura 6.20: Aumento da tortuosidade gerado por dispersão da argila.....	140
Figura 6.21: Curva de Variação do Coeficiente de Decaimento.....	142
Figura 6.22: Curvas de Chegada C/C0 x Volume de Poros para $\mu = 0,5\mu_{max}$ (média de μ n a curva logística) e μ variando com a curva logística.....	142

Figura 6.23: Curvas de Chegada C/C_0 x Volume de Poros– Solo Várzea CP1, CP2 e CP4	143
Figura 6.24: Curvas de Chegada C/C_0 x Tempo– Solo Várzea CP1, CP2 e CP4.....	144
Figura 6.25: Variação de k e Conc. dos Cátions x Volume de poros – Solo Várzea CP1	146
Figura 6.26: Variação de k e Conc. dos Cátions x Volume de poros – Solo Várzea CP2	146
Figura 6.27: Variação de k e Concentração dos Cátions x Volume de poros – Solo Várzea CP4.....	147
Figura 6.28: Variação de k e Concentração Cátions x Volume de poros – Solo Piçarra CP1.....	148
Figura 6.29: Variação de k e Concentração dos Cátions x Volume de poros – Solo Piçarra CP4.....	148
Figura 6.30: Variação de k e Concentração dos Cátions x Volume de poros – Solo Piçarra CP5.....	149
Figura 6.31: Variação de k e Concentração dos Cátions x Volume de poros – Solo Piçarra CP6.....	149
Figura 6.32: Variação de k e Concentração dos Cátions x Volume de poros – Solo Piçarra CP8.....	150
Figura 6.33: Variação de k e Concentração dos Cátions x Volume de poros – Solo Piçarra CP9.....	150
Figura 6.34: Gráfico Soma da Concentração Relativa (C/C_0) de Cálcio e Magnésio x Razão entre SAR e Salinidade.....	151
Figura 6.35: Variação de k e CE, pH e SAR x Volume de poros – Solo Várzea CP1...153	153
Figura 6.36: Variação de k e CE, pH e SAR x Volume de poros – Solo Várzea CP2...153	153
Figura 6.37: Variação de k e CE, pH e SAR x Volume de poros – Solo Várzea CP4...154	154
Figura 6.38: Variação de k, CE, pH e SAR x Volume de poros – Solo Piçarra CP4.....154	154
Figura 6.39: Variação de k, CE, pH e SAR x Volume de poros – Solo Piçarra CP5.....155	155
Figura 6.40: Variação de k, CE, pH e SAR x Volume de poros – Solo Piçarra CP6.....155	155
Figura 6.41: Variação de k e CE, pH e SAR x Volume de poros – Solo Piçarra CP8...156	156
Figura 6.42: Variação de k e CE, pH e SAR x Volume de poros – Solo Piçarra CP9...156	156
Figura 6.43: Fluido percolado coletado – Várzea.....158	158
Figura 6.44: Aumento da tortuosidade gerado por dispersão da argila.....159	159

Figura 6.45: Solo Vermelho - Frequência de Tamanho de Poros e poros passíveis de obstrução pela fase dissolvida.....	161
Figura 6.46: Solo Várzea - Frequência de Tamanho de Poros e poros passíveis de obstrução pela fase dissolvida.....	162
Figura 6.47: Solo Piçarra Proctor Normal - Frequência de Tamanho de Poros e poros passíveis de obstrução pela fase dissolvida.....	162
Figura 6.48: Solo Piçarra $E = 9\text{kgf.cm/cm}^3$ - Frequência de Tamanho de Poros e poros passíveis de obstrução pela fase dissolvida.....	163
Figura 6.49: Solo Piçarra Proctor Intermediário - Frequência de Tamanho de Poros e poros passíveis de obstrução pela fase dissolvida.....	163
Figura 6.50: Variação de k e Concentração de HTP x Volume de poros – Solo Várzea CP1.....	165
Figura 6.51: Variação de k e Concentração de HTP x Volume de poros – Solo Várzea CP2.....	165
Figura 6.52: Variação de k e Concentração de HTP x Volume de poros – Solo Várzea CP4.....	166
Figura 6.53: Vermelho CP1 - Perfis de umidade obtidos durante a infiltração.....	167
Figura 6.54: Vermelho CP2 - Perfis de umidade obtidos durante a infiltração.....	167
Figura 6.55: Vermelho CP3 - Perfis de umidade obtidos durante a infiltração.....	168
Figura 6.56: Vermelho CP3 - Perfis de Sucção obtidos durante a infiltração.....	168
Figura 6.57: Várzea CP1 - Perfis de umidade obtidos durante a infiltração.....	169
Figura 6.58: Várzea CP1 - Perfis de Sucção obtidos durante a infiltração.....	169
Figura 6.59: Várzea CP2 - Perfis de umidade obtidos durante a infiltração.....	170
Figura 6.60: Várzea CP2 - Perfis de Sucção obtidos durante a infiltração.....	170
Figura 6.61: Várzea CP4 - Perfis de umidade obtidos durante a infiltração.....	171
Figura 6.62: Várzea CP4 - Perfis de Sucção obtidos durante a infiltração.....	171
Figura 6.63: Piçarra CP1 - Perfis de umidade obtidos durante a infiltração.....	172
Figura 6.64: Piçarra CP4 - Perfis de umidade obtidos durante a infiltração.....	172
Figura 6.65: Piçarra CP5 - Perfis de umidade obtidos durante a infiltração.....	173
Figura 6.66: Piçarra CP6 - Perfis de umidade obtidos durante a infiltração.....	173
Figura 6.67: Piçarra CP8 - Perfis de umidade obtidos durante a infiltração.....	174
Figura 6.68: Piçarra CP9 - Perfis de umidade obtidos durante a infiltração.....	174

Figura 6.69: Solo Vermelho CP3 - Pontos obtidos por FDR e Tensiômetro e Curva de Retenção (Umedecimento).....	175
Figura 6.70: Solo Várzea CP1 - Pontos obtidos por FDR e Tensiômetro e Curva de Retenção (Umedecimento).....	176
Figura 6.71: Solo Várzea CP2 - Pontos obtidos por FDR e Tensiômetro e Curva de Retenção.....	176
Figura 6.72: Solo Várzea CP4 - Pontos obtidos por FDR e Tensiômetro e Curva de Retenção (Umedecimento).....	177
Figura 6.73: Solo Vermelho CP3 – Pontos do Método do Perfil Instantâneo e Curva de Condutividade pela Curva de Retenção.....	178
Figura 6.74: Solo Várzea CP1 – Pontos do Método do Perfil Instantâneo e Curva de Condutividade pela Curva de Retenção.....	178
Figura 6.75: Solo Várzea CP2 – Pontos do Método do Perfil Instantâneo e Curva de Condutividade pela Curva de Retenção.....	179
Figura 6.76: Solo Várzea CP4 – Pontos do Método do Perfil Instantâneo e Curva de Condutividade pela Curva de Retenção.....	179
Figura 6.77: Solo Vermelho CP1 – Calibração da Curva de Condutividade Hidráulica a partir dos resultados do TDR -30 cm.....	181
Figura 6.78: Solo Vermelho CP2 – Calibração da Curva de Condutividade Hidráulica a partir dos resultados do TDR -30 cm.....	182
Figura 6.79: Solo Vermelho CP3 – Calibração da Curva de Condutividade Hidráulica a partir dos resultados do TDR -30 cm.....	182
Figura 6.80: Curvas de Condutividade Calibradas – Solo Vermelho.....	183
Figura 6.81: Solo Várzea CP1 – Calibração da Curva de Condutividade Hidráulica a partir dos resultados do TDR -30 cm.....	183
Figura 6.82: Solo Várzea CP2 – Calibração da Curva de Condutividade Hidráulica a partir dos resultados do TDR -30 cm.....	184
Figura 6.83: Solo Várzea CP4 – Calibração da Curva de Condutividade Hidráulica a partir dos resultados do TDR -30 cm.....	184
Figura 6.84: Curvas de Condutividade Calibradas – Solo Várzea.....	185
Figura 6.85: Solo Piçarra CP1 – Calibração da Curva de Condutividade Hidráulica a partir dos resultados do TDR -30 cm.....	185
Figura 6.86: Curvas de Condutividade Calibradas – Solo Piçarra P. Normal.....	186

Figura 6.87: Solo Piçarra CP4 – Calibração da Curva de Condutividade Hidráulica a partir dos resultados do TDR -30 cm.....	186
Figura 6.88: Solo Piçarra CP5 – Calibração da Curva de Condutividade Hidráulica a partir dos resultados do TDR -30 cm.....	187
Figura 6.89: Solo Piçarra CP6 – Calibração da Curva de Condutividade Hidráulica a partir dos resultados do TDR -30 cm.....	187
Figura 6.90: Solo Piçarra CP8 – Calibração da Curva de Condutividade Hidráulica a partir dos resultados do TDR -30 cm.....	188
Figura 6.91: Solo Piçarra CP9 – Calibração da Curva de Condutividade Hidráulica a partir dos resultados do TDR -30 cm.....	188
Figura 6.92: Curvas de Condutividade Calibradas – Solo Piçarra P. Intermediário.....	189
Figura 6.93: Gráfico Concentração x Tempo – Solo Várzea.....	190
Figura 6.94: Gráfico Umidade x Tempo – Solo Várzea.....	191
Figura 6.95: Corte transversal barragem com redução de k e com decaimento.....	192
Figura 6.96: Corte transversal barragem com redução de k e sem decaimento.....	192
Figura 6.97: Corte transversal barragem sem redução de k e com decaimento.....	192
Figura 6.98: Corte transversal barragem sem redução de k e sem decaimento.....	192
Figura 6.99: Corte transversal barragem com redução de k e com decaimento.....	193
Figura 6.100: Corte transversal barragem com redução de k e sem decaimento.....	193
Figura 6.101: Corte transversal barragem sem redução de k e com decaimento.....	193
Figura 6.102: Corte transversal barragem sem redução de k e sem decaimento.....	193
Figura 6.103: Gráfico Umidade x Tempo – Solo Piçarra.....	194
Figura 6.104: Gráfico Concentração x Tempo – Solo Piçarra.....	195
Figura 6.105: Corte transversal barragem sem redução de k (Piçarra).....	196
Figura 6.106: Corte transversal barragem com redução de k (Piçarra).....	196
Figura 6.107: Gráfico Umidade x Tempo – Solo Vermelho.....	197
Figura 6.108: Gráfico Concentração x Tempo – Solo Vermelho.....	198
Figura 6.109: Corte transversal barragem sem redução de k (Vermelho).....	199
Figura 6.110: Corte transversal barragem com redução de k (Vermelho).....	199

ÍNDICE DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

A	Área (L^2); Argila
AF	Areia Fina
AG	Areia Grossa
AM	Areia Média
BTEX	Benzeno, tolueno, etilbenzeno e xilenos
c	Constante adimensional de proporcionalidade que leva em consideração propriedades do solo
C	Concentração do soluto (M/L^3)
C_0	Concentração inicial do soluto (M/L^3)
CE	Condutividade Elétrica
CL	Argila de Baixa Plasticidade
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CP	Corpo de Prova
d	Diâmetro dos grãos (L)
D	Diâmetro dos poros (L)
D_0	Coefficiente de difusão molecular em solução (L^2/T)
D_m	Coefficiente de dispersão mecânica (L^2/T)
D_f	Coefficiente de difusão molecular efetivo (L^2/T)
D_h	Coefficiente de dispersão hidrodinâmica (L^2/T)
DRX	Difratometria de Raios-X
E	Energia de Compactação
e	Número de Euler $\approx 2,718$
FRX	Fluorescência de Raios-X
FDR	<i>Frequency Domain Reflectometry</i>
GEOAMB	Laboratório de Geotecnia Ambiental da UFBA
HPA	Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos
HTP	Hidrocarbonetos Totais de Petróleo
g	Constante de aceleração da gravidade (L/T^2)
i	Gradiente hidráulico (Adimensional)
IA	Índice de Atividade
IP	Índice de Plasticidade
J_d	Fluxo de massa por difusão de soluto (M/L^2T)
J_m	Fluxo de dispersão mecânica (M/L^2T);

k	Condutividade hidráulica do solo (L/T)
K	Permeabilidade intrínseca, com dimensão (L ²)
K _d	Coefficiente de partição ou distribuição água/solo [L ³ /M]
K ₁	Constante empírica de decaimento
K _L	Constante que reflete a supressão do crescimento da população por excesso de concentração
K _s	Concentração de substrato quando o coeficiente de degradação é a metade do máximo
LEDMA	Laboratório de Ensaios em Durabilidade dos Materiais
Lepetro	Laboratório de Estudos do Petróleo
m	Parâmetro de ajuste
m _{est}	Parâmetro m relativo ao primeiro segmento da curva bimodal
m _{tex}	Parâmetro m relativo ao segundo segmento da curva bimodal
n	Porosidade
n	Parâmetro de ajuste
n _{est}	Parâmetro n relativo ao primeiro segmento da curva bimodal
n _{tex}	Parâmetro n relativo ao segundo segmento da curva bimodal
NBR	Norma Brasileira
NFD	Naftalenos, fenantrenos e dibenzotiofenos.
OGP	<i>International Association of Oil and Gas Producers</i>
P	Pedregulho
Pe	Número de Peclet
pH	Potencial de Hidrogênio
PVC	Policloreto de polivinila
Q	Vazão (L ³ /T)
r	Raio
R1	Raio de curvatura ortogonal ao menisco (L)
R2	Raio de curvatura ortogonal ao menisco (L)
SAR	<i>Sodium Absorption Ratio</i>
S	Concentração de soluto adsorvida (M/L ³); Silte
SC	Areia Argilosa
Sr	Grau de Saturação
STF	Sólidos Fixos
STV	Sólidos Totais Voláteis
SUCS	Sistema Unificado De Classificação Dos Solos

t	Tempo (T)
T	Tempo de meia vida (T)
t_0	Tempo para o qual o módulo de μ é igual a $0,001\mu_{\max}$, e indicaria o tempo para o início da biodegradação.
t_1	Tempo o qual o módulo de μ é igual a 0,5 de μ_{\max}
TDR	<i>Time Domain Reflectometry</i>
T_s	Tensão superficial do fluido
TOC	Carbono Orgânico Total
UCM	Mistura complexa não resolvida
UFBA	Universidade Federal da Bahia
USDA	<i>United States Department of Agriculture</i>
UTPF	Unidade de Tratamento e Processamento de Fluidos
u_a	Pressão de ar
u_w	Pressão positiva da água
v	Velocidade de descarga ou vazão unitária em (L/T)
V_p	Volume de Poros
v_s	Velocidade média nos poros (L/T);
X_0	Concentração necessária para crescimento da população
w	Teor de umidade gravimétrico
wot	Umidade ótima de compactação
W_L	Limite de liquidez
W_P	Limite de plasticidade
Wz	Armazenagem de água no solo (L^3/L^2) entre a profundidade z_1 e a profundidade z_2 .
z	Potencial gravitacional (L), coordenada vertical de posição (L)
α	Parâmetro de ajuste
α_s	Coefficiente de dispersividade na direção considerada
α_p	Ângulo de contato com o poro
α_{est}	Parâmetro α relativo ao primeiro segmento da curva bimodal
α_{tex}	Parâmetro α relativo ao segundo segmento da curva bimodal
β	Constante relacionada à velocidade do crescimento de μ
γ_w	Constante de produção da fase líquida
γ_s	Constante de produção da fase sólida

θ	Teor de umidade volumétrico
θ_{pmp}	Teor de umidade volumétrico intermediário ou do patamar
θ_r	Teor de umidade volumétrico residual
θ_s	Teor de umidade volumétrico saturado
μ_{max}	Coefficiente máximo de degradação
μ	Coefficiente de degradação; viscosidade dinâmica do fluido (M/LT)
μ_w	Constante de decaimento da fase líquida
μ_s	Constantes de decaimento da fase sólida
ρ	Densidade ou massa específica (M/L ³)
ρ_w	Massa específica da água (M)
ρ_d	Densidade do solo seco [M/L ³]
ρ_{dmax}	Densidade máxima seca de compactação [M/L ³]
ψ	Potencial Total (ML/T ²)
ψ_b	Sucção de entrada de ar
ψ_t	Potencial Térmico (ML/T ²)
ψ_p	Potencial de Pressão (ML/T ²)
ψ_g	Potencial Gravitacional (ML/T ²)
ψ_m	Potencial Matricial (ML/T ²)
ψ_o	Potencial Osmótico (ML/T ²)
ψ_{fluido}	Potencial devido à pressão exercida pela coluna de fluido (L)
$\psi_{\text{sobrepressão}}$	Potencial devido à pressão exercida pelo ar comprimido (L)
ω	Coefficiente de tortuosidade

1. INTRODUÇÃO

O petróleo se consolidou como recurso estratégico e de extrema importância, encontrando-se no centro da matriz de transporte de todo o planeta e presente nas mais diversas cadeias produtivas, já que se trata de uma matéria-prima e fonte de energia ainda com uma boa relação custo-benefício apesar de diversas inovações no setor de energias renováveis.

Entretanto, em quase toda a cadeia produtiva dos combustíveis comercialmente utilizados, a indústria do petróleo possui um expressivo potencial de degradação do meio ambiente. Durante o processo de extração do petróleo é gerado um grande volume de água produzida ou água de produção, um fluido quimicamente complexo, o que torna difícil a previsão do seu comportamento durante um vazamento. O volume de água produzida gerado na atividade de produção de petróleo, seja *onshore* ou *offshore*, pode chegar a ser o maior, dentre todos os resíduos gerados pela indústria petrolífera (IFC, 2007a; IFC, 2007b). A água de produção é muitas vezes mais salgada que a água do mar e pode conter toxinas, metais pesados, além de apresentar radioatividade, dependendo da formação geológica de onde foi retirada (FARAG E HARPER, 2014). Devido ao grande volume gerado, sua complexa composição química e a falta de conhecimento acerca dos efeitos ecológicos de longo prazo, este talvez seja um dos aspectos ambientais mais relevantes de toda indústria petrolífera (BAKKE et al., 2013).

Por outro lado, na construção de bacias de contenção de derivados de petróleo, a norma brasileira NBR 17505-2 (2015) especifica que bacias de contenção devem ter coeficiente de permeabilidade máximo de 1×10^{-6} cm/s, referenciado à água. Para a obtenção destes valores, na indústria petrolífera, a construção de bacias de contenção utilizando solo argiloso é a técnica mais difundida, devido à sua eficiência comprovada na retenção de água e ao baixo custo de implantação. Esta eficiência, contudo, é reduzida quando os fluidos empregados possuem polaridade inferior a da água, como no caso da grande maioria dos derivados de petróleo, conforme resultados experimentais relatados por vários autores (OLIVEIRA, 2001; CARDOSO, 2012).

Além disso, em se tratando da infiltração da água de produção, é relevante destacar que alguns solos, quando percolados por fluidos específicos, tendem a modificar sua distribuição porosimétrica e, conseqüentemente, a permeabilidade do meio, o que pode

influenciar na performance das bacias de contenção. Esta análise deve ser complementada com o conhecimento do transporte dos contaminantes dissolvidos na água de produção. Somente conhecendo o comportamento da migração dos solutos da água de produção ao percolar a barreira de solo argiloso, é possível modelar com mais propriedade a performance da bacia de contenção após a ocorrência de vazamentos em campo. A comparação dos valores previstos de concentração de contaminantes no fluido que percolaria a bacia com os valores de referência ambiental, viabiliza tomada de decisões mais efetivas, diminuindo o custo de intervenções e ajuda a estabelecer critérios para a construção de bacias mais econômicas.

2. JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA

Conforme foi relatado por Silva e Pegado (2009), os principais impactos da atividade petrolífera estão relacionados, entre outras fontes, à disponibilização de óleo e dejetos decorrentes de vazamentos ou da má destinação destes fluidos.

A contaminação do solo pode gerar problemas como danos à saúde humana, comprometimento da qualidade dos recursos hídricos, restrições ao uso do solo e danos ao patrimônio público e privado, como a desvalorização das propriedades, além de danos ao meio ambiente (CETESB, 2006).

Neste contexto, é de extrema importância a mitigação destes possíveis impactos ambientais através de mecanismos e tecnologias que atuem durante o processo de produção. Tal ideologia está explícita no Relatório de Sustentabilidade da PETROBRAS (2010): “Conhecer, prevenir e mitigar os impactos ambientais de nossas operações e produtos são diretrizes expressas no Plano de Negócios”.

Um dos principais mecanismos de prevenção de contaminação de solos e águas subterrâneas é o uso de bacias compostas por minerais argilosos (diques de proteção). As bacias de contenção são construídas ao redor dos tanques verticais de armazenamento e das áreas de exploração do petróleo para conter lateralmente e verticalmente eventuais vazamentos.

Souza (2014) apresentou que há uma carência de referências normativas nacionais adequadas a uma análise consistente das condições de estanqueidade de bacias de contenção não revestidas de tanques de armazenamento de hidrocarbonetos evidenciada pela obsolescência da NBR 17505-2 (2015) nesse quesito.

Carvalho *et al.* (2015) verificaram que o grau de saturação influencia na permeabilidade e que as intempéries reduzem a eficiência das bacias de contenção, normalmente constituídas de solos argilosos, que apresentam importantes variações volumétricas por secagem/umedecimento, com o consequente aparecimento de trincas e fissuras.

Considerando os riscos ambientais associadas ao desconhecimento do comportamento da água de produção nas bacias de contenção e os altos custos de remediação de vazamentos ou de utilização de técnicas alternativas para melhoramento da estanqueidade das bacias, torna-se necessário um estudo mais aprofundado da interação da água de produção com o

solo, destacando o comportamento dos seus contaminantes, com as barreiras de solo compactado.

3. OBJETIVOS DE PESQUISA

3.1. Geral

Analisar a infiltração e migração dos contaminantes da água de produção de petróleo em solo areno-argiloso não saturado compactado com a finalidade de definir parâmetros que possibilitem a tomada de decisões na construção de barreiras de contenção e na mitigação em casos de derramamento na área de produção.

3.2. Específicos

Determinar parâmetros de transporte (condutividade hidráulica saturada e não saturada, curvas de infiltração, curvas de chegada e curva de retenção do solo) utilizando o ensaio de coluna monitorada.

Analisar e modelar a interação entre o solo e a água de produção verificando a eventual ocorrência de biodegradação dos componentes orgânicos.

Identificar possíveis causas para a redução da permeabilidade saturada ao longo da percolação da água de produção nos solos argilosos compactados.

Realizar a modelagem da infiltração e da migração dos contaminantes da água de produção utilizando aplicativos de simulação de problema de fluxo e de simulação do problema de transporte de solutos, avaliando o comportamento de uma bacia de contenção construída com os solos estudados em uma situação hipotética de vazamento em campo.

4. REVISÃO DE LITERATURA

4.1. Água de Produção de Petróleo

4.1.1. Principais Componentes

A água de produção é uma mistura complexa de compostos químicos orgânicos e inorgânicos naturalmente ocorrentes que foram dissolvidos ou dispersados na forma de particulados das formações geológicas e rotas de migração onde esse efluente esteve represado por milhares de anos (NEFF *et al.*, 2011A). A água de produção é carregada junto com o óleo e gás durante a produção do petróleo e é proveniente da formação geológica misturada com a água de injeção. Suas propriedades físicas e químicas podem variar bastante, de acordo com a idade geológica, profundidade, características geoquímicas e localização da formação rochosa, assim como da composição química das fases de óleo e gás no reservatório e processos adicionados durante a produção (HOSSEINI *et al.*, 2012). A água de produção contém também íons em solução em concentrações variadas dependendo da fonte de onde é retirada. Em ambientes *offshore* a salinidade apresenta-se mais elevada do que em ambientes *onshore*. A salinidade pode ser atribuída, em maior parte, pela dissolução do sódio e cloreto e, em menor proporção, a cátions cálcio, magnésio e potássio, conforme pode ser verificado na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 Composição de Cátions e Ânion em águas (g/L)

Íon	Água de Rio	Água de Mar	Água Petrolífera <i>Offshore</i>
Na ⁺	0,006	10,8	53,9
K ⁺	0,002	0,4	0,0
Mg ²⁺	0,004	1,3	2,1
Ca ²⁺	0,015	0,4	15,0
Cl ⁻	0,008	19,4	115,9
SO ₄	0,011	2,7	0,1
HCO ₃ ⁻	0,059	1,4	0,05

Fonte: Modificado de Gabardo (2007)

Os compostos orgânicos são os mais abundantes na água produzida e os que conferem maior preocupação do ponto de vista ambiental em relação ao seu descarte. Dentre os

principais compostos orgânicos presentes na água de produção representam a sua maioria, os hidrocarbonetos de petróleo, ácidos carboxílicos e fenóis (NEFF *et al*, 2011A).

Os hidrocarbonetos de petróleo, compostos químicos orgânicos constituídos apenas de hidrogênio e carbono, são os que merecem maior preocupação quando presentes na água produzida (ELKINS *et al*, 2005). Neste efluente, os hidrocarbonetos de petróleo podem aparecer tanto na forma dissolvida, quanto na forma dispersa (gotículas de óleo) e são divididos em dois grupos: hidrocarbonetos aromáticos e hidrocarbonetos saturados. (NEFF *et al.*, 2011A).

Sua solubilidade na água decresce conforme aumenta seu peso molecular e de maneira geral, compostos aromáticos são mais solúveis do que compostos saturados de mesmo peso molecular (NEFF *et al*, 2011A).

A maior parte dos hidrocarbonetos descartados junto à água de produção está dissolvida e é de baixo peso molecular. A parcela de hidrocarbonetos saturados pesados, por ser menos solúvel, mantém-se na forma dispersa. (FAKHURU'L-RAZI *et al*, 2009). Ainda que se utilize separadores de água e óleo para remoção de gotículas de óleo da água, este processo não é eficiente para a retirada de hidrocarbonetos dissolvidos, ácidos orgânicos, fenóis e metais.

Os compostos orgânicos presentes na água de produção são divididos em quatro grupos: alifáticos (incluindo os naftênicos), aromáticos, polares e ácidos graxos. Os compostos alifáticos (em maior quantidade), juntamente com os aromáticos, constituem os chamados “hidrocarbonetos da água produzida” (OLIVEIRA e OLIVEIRA, 2000).

Os hidrocarbonetos aromáticos são uma classe de compostos cíclicos insaturados com uma cadeia de carbonos e hidrogênios com diversas características físicas e químicas específicas. São separados em três grupos de acordo com a OGP (2002):

BTEX – benzeno, tolueno, etilbenzeno e xilenos. Estes são os compostos frequentemente mais abundantes na água de produção.

NFD – naftalenos, fenantrenos e dibenzotiofenos.

HPA – compostos policíclicos aromáticos representados pelos 16 HPA prioritários (exceto naftalenos, fenantrenos)

Os compostos BTEX se caracterizam por serem altamente voláteis e mais solúveis em água em relação aos outros grupos. Apresentam-se em maiores concentrações na água de produção.

Os hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPAs) são definidos como aqueles que apresentam dois ou mais anéis aromáticos fusionados e tratam-se dos compostos que conferem maior toxicidade à água produzida, causando maiores preocupações do ponto de vista ambiental.

Vale ressaltar ainda que, na água produzida sem tratamento, gotículas de óleo ainda estão presentes no efluente em questão e, portanto, há presença de hidrocarbonetos aromáticos de alto peso molecular, na sua forma dispersa. Estes têm alto potencial de toxicidade e danos aos organismos, representando graves riscos ao meio ambiente (NEFF *et al.*, 2011A).

4.2. Potenciais da água nos Solos

A água presente nos solos apresenta uma quantidade de energia que pode ser dividida em energia potencial e cinética. A energia cinética, na maioria das vezes, pode ser desprezada, já que o movimento da água é muito lento, o que torna a magnitude desta energia ínfima diante da energia potencial.

A energia potencial, que neste caso também pode ser denominada carga total (energia/peso), é determinante na migração da água dentro do solo. Durante este movimento, a água sempre segue na direção da maior energia potencial, ou carga, para a menor.

Segundo Reichardt e Timm (2004), o potencial total, ou potencial hidráulico, pode ser definido por uma composição de cinco parcelas de potenciais menores, conforme a Equação 1:

$$\Psi = \Psi_t + \Psi_p + \Psi_g + \Psi_m + \Psi_o \quad (1)$$

Onde:

Ψ_t é o potencial térmico, proveniente de variações de temperatura da água no solo;

Ψ_p é o potencial de pressão, considerada somente quando a pressão atuante sobre a água é maior que a pressão atmosférica;

ψ_g é o potencial gravitacional, representa a energia potencial do campo gravitacional da terra e está relacionada com a elevação do ponto em consideração a um referencial;

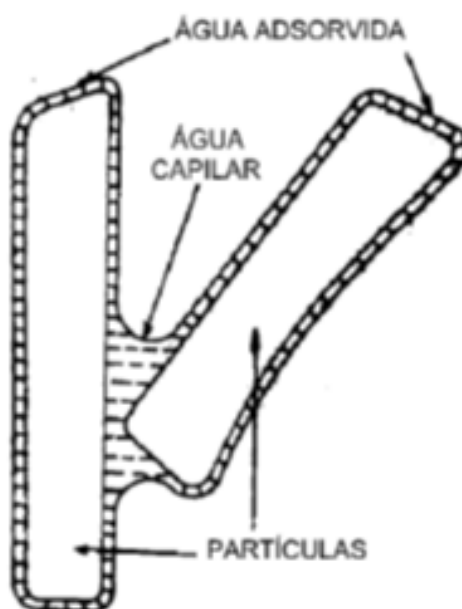
ψ_m é o potencial matricial; corresponde à pressão negativa da água em meios não saturados, decorrente das forças capilares e as forças de adsorção que atraem as partículas

ψ_o é o potencial osmótico, função da concentração de solutos na água intersticial.

No estudo de fluxo em solos não saturados, o potencial matricial, também chamada de sucção matricial por ser sempre negativo, é aquele que merece um enfoque mais aprofundado. Os valores de sucção matricial variam ao longo do tempo, dependendo da quantidade de água presente nos poros, a qual é função da interação solo/meio ambiente.

A sucção ocorre, basicamente, devido às forças capilares e às forças de adsorção que atraem as partículas de água para as partículas sólidas, como pode ser verificado na Figura 4.1:

Figura 4.1: Água Capilar e de Adsorção

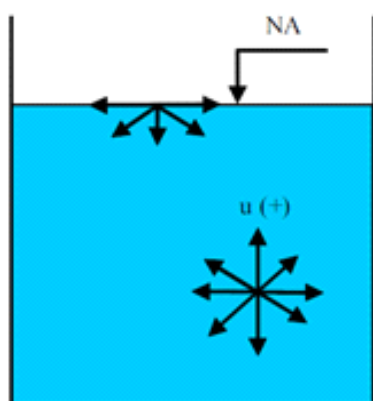


Fonte: Gerscovich (1994)

A capilaridade está relacionada à macroestrutura do solo. A adsorção, por sua vez, está associada à microestrutura do solo, e depende do nível de hidratação dos minerais argilosos (DE CAMPOS *et al.*, 1992).

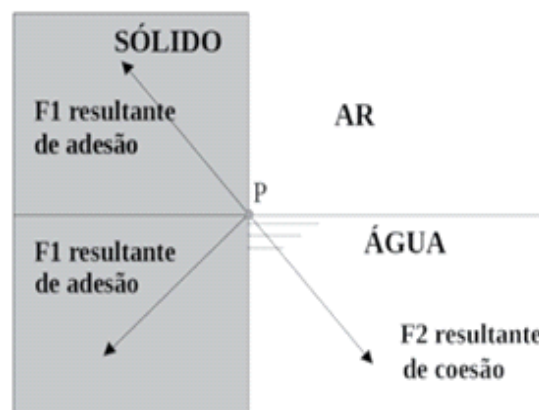
O efeito da capilaridade ocorre devido ao desbalanceamento de forças de atração entre as moléculas presentes na interface líquido-gás dentro do poro, medida pela tensão superficial. Considerando o modelo de um tubo capilar como representativo do poro, verifica-se que, no caso da água, na superfície do menisco, as forças em direção à fase gasosa são menores que as forças em direção à fase líquida, diferente do que ocorre dentro do líquido, onde todas as forças são de igual intensidade (Figura 5.15). Esta diferença de intensidades resulta em forças direcionadas ao interior do tubo, conforme mostra a Figura 5.16.

Figura 4.2: Desbalanceamento de Forças na Interface Líquido-gás



Fonte: Ferreira (2010)

Figura 4.3: Formação de meniscos capilares



Fonte: Libardi (1993) apud Carvalho *et al.* (2015)

A adsorção é um fenômeno resultante da ação de forças elétricas desbalanceadas que ocorrem na superfície das partículas do solo. Nos solos argilosos, a adsorção acarreta a formação de uma dupla camada, com propriedades de resistência e viscosidade diferentes da água pura, nas mesmas condições de temperatura e pressão. A água presente na camada dupla é responsável pelos elevados teores de umidade em solos argilosos, mesmo para altos valores de sucção (GERSCOVICH, 1994).

4.3. Propriedades Hidráulicas de Solos Saturados

4.3.1. Condutividade Hidráulica Em Meio Saturados

O primeiro passo para conhecimento das propriedades hidráulicas em solos saturados foi dado em 1856, por Henry Darcy, quando a partir da realização de experimentos na condição de equilíbrio dinâmico dos fluidos, concluiu que a vazão unitária da água (v) seria diretamente proporcional ao gradiente médio de energia através do solo (i), sendo chamada de Lei de Darcy:

$$v = k \cdot i \quad (2)$$

Onde:

v = velocidade de descarga ou vazão unitária em (L/T);

k = condutividade hidráulica do solo ou coeficiente de permeabilidade, em (L/T);

i = gradiente hidráulico, definido pela razão entre a perda de carga Δh ao longo de uma distância ΔL de percolação (Adimensional).

A Equação 2 pode ser escrita em função da vazão já que quando o fluxo passa através de uma seção transversal, é possível determinar a vazão Q (L³/T) multiplicando-se a área A (L²) pela velocidade de descarga v (L/T):

$$Q = k \cdot i \cdot A \quad (3)$$

Apesar de ser amplamente utilizada, a Lei de Darcy possui restrições. Para aplicação de Lei de Darcy a velocidade do fluxo deve ser relativamente baixa, garantindo que o fluxo se encontre no estado laminar. Reynolds (1883) mostrou que a velocidade de percolação da água é uma função do gradiente hidráulico, e que existe uma velocidade crítica abaixo da qual o regime é laminar, havendo proporcionalidade entre o gradiente hidráulico e a velocidade do

fluxo. Acima desta velocidade crítica, o fluxo torna-se turbulento, e a lei de Darcy não é mais válida (HEAD, 1994).

A partir das conclusões de Darcy, outra contribuição importante para o conhecimento existente hoje foi dada por Nutting (1930). Nutting realizou uma série de experimentos de fluxo com água em permeâmetros com solos granulares com diferentes diâmetros e posteriormente com fluidos diferentes, concluindo que a textura dos solos aliada a viscosidade dinâmica (μ) e a densidade dos fluidos (ρ) influenciariam também na velocidade de percolação. Nutting (1930) propôs então o conceito de permeabilidade intrínseca, K , a qual pode ser escrita de acordo a equação 4:

$$k = \frac{K \cdot \rho \cdot g}{\mu} \quad (4)$$

Onde:

ρ é a densidade do fluido (M/L^3);

μ é a viscosidade dinâmica do fluido (M/LT);

g é a constante de aceleração da gravidade (L/T^2);

K é a permeabilidade intrínseca, com dimensão (L^2), representada por:

$$K = c \cdot d^2 \quad (5)$$

Onde:

c é uma constante adimensional de proporcionalidade que leva em consideração propriedades do solo tais como: esfericidade dos grãos, distribuição dos tamanhos dos grãos, natureza do arranjo, etc;

d é um diâmetro característico dos grãos (L).

Conforme foi explanado por Oliveira (2001), de maneira geral na Europa, e mesmo aqui no Brasil, emprega-se o termo coeficiente de permeabilidade como sinônimo para o termo condutividade hidráulica saturada, que representa a constante de proporcionalidade (k) da Lei de Darcy. No entanto, a literatura de língua inglesa emprega o termo “hydraulic conductivity” para significar a condutividade hidráulica, enquanto o termo “permeability” é

normalmente utilizado para significar a permeabilidade intrínseca (K). Esta terminologia é mais concisa e evita as constantes confusões entre condutividade hidráulica e permeabilidade, por isso, essa terminologia foi utilizada em seu trabalho e será adotada neste também.

4.3.1.1. Fatores que Influenciam a Condutividade Hidráulica

A condutividade hidráulica depende das propriedades do solo, por exemplo: a distribuição dos grãos, a forma e textura, a composição mineralógica, o índice de vazios, o grau de saturação, a estrutura e a anisotropia. Também influenciam na condutividade hidráulica as características do fluido como: o peso específico, a viscosidade, a temperatura e a polaridade do fluido. Em meios porosos, em casos onde não há continuidade entre os macroporos, a intensidade do fluxo será ditada pelos microporos. Assim, quanto menor o tamanho dos grãos, menores e mais frequentes serão os microporos e maior será a resistência ao fluxo. Partículas que apresentam formas irregulares ou alongados também geram caminhos mais tortuosos para o fluxo do que partículas quase esféricas, reduzindo a condutividade hidráulica do meio.

Para solos compactados, estudos mostraram que a compactação do solo e, conseqüentemente, o aumento da contribuição dos poros menores poder resultar em menor k. (FERRERO *et al.*, 2007) A compactação pode reduzir não apenas o volume de macroporos, mas também sua continuidade. (LIPIEC e STEPNIIEWSKI, 1995; ARVIDSSON, 1997). Em um solo compactado, o aumento na densidade aparente e a diminuição nos volumes de poros com diâmetro de poros equivalente $> 150 \mu\text{m}$ ou $> 60 \mu\text{m}$ (dependendo do local) resultaram em valores de k significativamente menores (ZHANG *et al.*, 2006). Altos valores de condutividade hidráulica são predominantemente governados pela abundância de poros relativamente grandes e sua continuidade (PAGLIAI *et al.*, 2003; LIPIEC E HATANO, 2003; ZHAO *et al.*, 2010). A mudança nos macroporos tende a ter uma forte influência nos valores de k. Em diversos estudos houve uma drástica redução da condutividade hidráulica após a compactação do solo (DAWIDOWSKI e KOOLEN, 1987; DEBICKI *et al.*, 1993; HAKANSSON e MEDVEDEV, 1995). O efeito da compactação do solo no fluxo de água saturada está relacionado com a redução e interrupção da continuidade dos poros maiores e conseqüentemente do fluxo preferencial (EHLERS, 1975; LIN *et al.*, 1996, 1999; LIPIEC *et al.*, 1998) induzindo a que o fluxo seja ditado pelos microporos.

Quanto à umidade de compactação, no caso de solos compactados, segundo Daniel e Benson (1990), a estrutura do solo compactado é fator importante na condutividade hidráulica. As argilas têm condutividade hidráulica mais baixa quando compactadas no ramo úmido da curva de Proctor (umidade levemente acima da ótima) por causa da estrutura dispersa do solo. Tal fenômeno deve-se ao fato de que, para uma dada energia de compactação nos solos mais úmidos, os grumos responsáveis pela presença dos macroporos na estrutura são mais facilmente quebráveis do que nos solos mais secos, de forma que nessa situação ocorre maior homogeneidade e, conseqüentemente, menor quantidade de caminhos preferenciais para o fluxo de líquidos.

Considerando a origem mineralógica, Lambe e Withman (1979) propõem que nos siltes, areias ou pedregulhos, tal fator não tem muita importância, exceto na ocorrência de matéria orgânica e mica. Em se tratando de solos finos, como no caso as argilas, este fator é de extrema importância. De forma geral, o tipo e a quantidade de argilominerais influenciam no valor de k , sendo que a condutividade hidráulica à água é menor quanto maior for a ocorrência de argila.

Oliveira (2001), por meio de experimentos com argila (bentonita e caulinita) percolada por água e produtos orgânicos, verificou que solos com fração argilosa têm sua permeabilidade influenciada não apenas pelas propriedades inerentes à matriz porosa, mas também pelas propriedades físico-químicas dos líquidos. Quanto maior for a constante dielétrica dos fluidos permeando sedimentos argilosos, maior será a propensão das argilas de adsorverem o líquido. Conseqüentemente, a permeabilidade intrínseca dos solos finos varia de forma inversa à constante dielétrica do fluido (SCHRAMM *et al*, 1986). Soluções diluídas, isto é, concentrações na solubilidade limite ou mais baixa de hidrocarbonetos na água, não tem efeito na condutividade hidráulica de solos argilosos. Permeação com hidrocarbonetos puros invariavelmente influencia a condutividade hidráulica da argila. (MITCHELL E MADSEN, 1987)

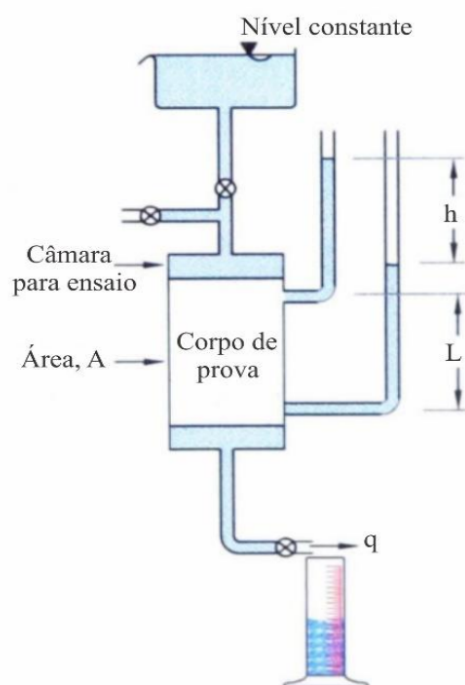
4.3.1.2. Métodos para Determinação de Condutividade Hidráulica Saturada

Para determinar a condutividade hidráulica saturada foram desenvolvidos diversos métodos, os quais podem ser laboratoriais ou de campo. São apresentados abaixo os dois procedimentos laboratoriais mais empregados para a determinação de k .

Método Do Permeâmetro Com Carga Constante

No ensaio para determinação da condutividade hidráulica com carga constante, o fornecimento de fluido para a amostra de solo é ajustado de modo que a diferença de energia entre a entrada e a saída do corpo de prova permaneça constante durante o período de realização do ensaio, sendo a vazão gerada monitorada ao longo do tempo (CARDOSO, 2011). Assumindo a validade da Lei de Darcy, sob condições de regime permanente, a vazão medida na entrada do corpo de prova é igual à vazão medida na saída do corpo de prova. Este ensaio está normatizado pela NBR 13292 (1995) e o esquema do ensaio está apresentado na Figura 4.4.

Figura 4.4: Esquema do ensaio de determinação da condutividade hidráulica com o método de carga constante

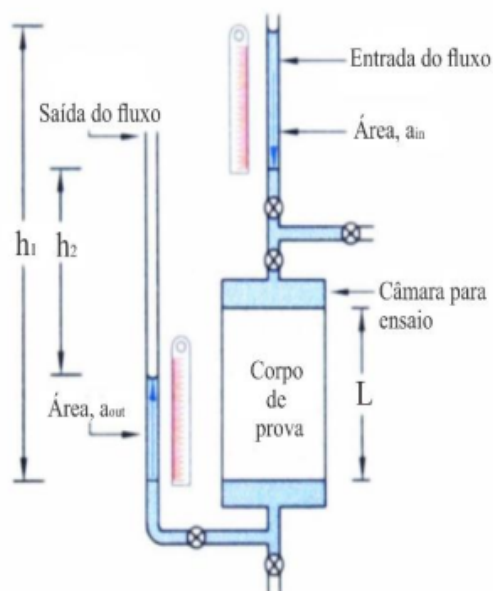


Fonte: Martinez (2016) modificado de Agab (2005)

Método Do Permeâmetro Com Carga Variável

Este método é usado em solos que possuem condutividade hidráulica abaixo de 1×10^{-4} cm/s. No ensaio com carga variável, a água contida em um reservatório flui através da amostra de solo sendo coletada em uma bureta graduada, reduzindo a diferença entre as cargas no reservatório e na bureta conectada no corpo de prova. Estudando-se a redução da diferença de cargas ao longo do tempo, é possível determinar a vazão e a condutividade hidráulica. Este ensaio está normatizado pela NBR 14545 (2000) e o esquema do ensaio está apresentado na Figura 4.5

Figura 4.5: Esquema do ensaio de determinação da condutividade hidráulica com o método de carga variável



Fonte: Martinez (2016) modificado de Agab (2005)

4.3.2. Redução Da Condutividade Hidráulica Durante Percolação

Ao contrário do que é esperado durante a percolação de um fluido por um meio poroso, em alguns casos, após a completa saturação do solo a condutividade hidráulica não se mantém constante. Segundo Vandevivere e Baveye (1992c), isto ocorre porquê as

propriedades hidráulicas dos meios porosos podem mudar ao longo do tempo. As causas dessa mudança podem ser divididas em três classes: física, química e microbiana.

Shackelford e Jefferis (2000) realizaram ensaios de permeabilidade em misturas de cimento e bentonita e água e citam os seguintes motivos para a redução observada de permeabilidade:

- Obstrução por deposição de carbonato de cálcio nos poros do material
- Obstrução por deposição de qualquer matéria em suspensão presente na água.
- Obstrução por atividades de bactérias e formação de biofilme.

Além das causas citadas por estes autores, também é citada na literatura, principalmente na Agronomia e na Engenharia de Petróleo, a obstrução por dispersão da argila (GRAY E REX, 1966; REED, 1972; FRENKEL *et al.*, 1978; SHAINBERG E LETEY, 1984; YOUSAF *et al.*, 1987; CURTIN *et al.*, 1994, MOGADHASI *et al.*, 2004)

4.3.2.1. Redução de Condutividade Hidráulica Por Dispersão da Argila

A redução da condutividade hidráulica durante o processo de percolação de fluidos pelas camadas de solo é um tema bastante relevante e tem sido extensamente estudado pela Engenharia do Petróleo, pela Agronomia e pela Engenharia Ambiental.

Segundo a USDA (1954), o movimento da chuva ou da água de irrigação através dos solos é capaz de causar deterioração estrutural e diminuir a condutividade hidráulica dos solos. A dispersão de argilas, seguida pela migração de partículas de argila e obstrução dos poros de condução de água, é considerada como um dos principais processos causadores de problemas estruturais em solos irrigados (FRENKEL *et al.*, 1978; SHAINBERG e LETEY, 1984; YOUSAF *et al.*, 1987). De acordo com Curtin *et al.* (1994), a irrigação com águas que apresentam altas concentrações de Na em relação a cátions bivalentes (ou seja, águas sódicas) pode causar deterioração da estrutura do solo. Quando as soluções diluídas são introduzidas no solo, a argila pode expandir e dispersar e pode ser movida para baixo do perfil na solução percolante. Isto pode preencher parcialmente ou bloquear poros e canais no solo e reduzir ainda mais a condutividade hidráulica (ROWELL *et al.*, 1969).

Na área da produção de petróleo, Mohan *et al.* (1998) afirmam que a maioria das formações de arenito com suporte de óleo contém argilas, expansivas ou não. No decurso da perfuração e recuperação de óleo, estas argilas causam uma redução na condutividade hidráulica das formações de arenito consolidadas devido ao contato com fluídos de

perfuração. Essa redução na condutividade hidráulica, também conhecida como dano da formação (*formation damage*), pode resultar de mudanças na composição iônica aquosa do fluido percolante e os arenitos que exibem esse tipo de comportamento são chamados sensíveis à água. O dano da formação é uma terminologia genérica que se refere ao comprometimento da condutividade hidráulica das formações portadoras de petróleo por diversos processos. Os processos fundamentais que causam danos em formações de petróleo são: físico-químico, químico, hidrodinâmico, térmico e mecânico (MOGADHASI *et al.*, 2004). Reed (1972) e Gray e Rex (1966) verificaram que o dano de formação por soluções aquosas normalmente pode ser evitado mesmo em areias muito argilosas, mantendo uma quantidade mínima de sal dissolvido na solução percolante.

Abu-Sharar *et al.* (1987) ao avaliarem a importância da dispersão de argila como a causa da redução da condutividade hidráulica em solos lixiviados com soluções sódicas concluíram que a degradação dos agregados de solo em microagregados de tamanho argiloso, um processo que eles chamaram de desaceleração, foi uma causa primária. Segundo Mogadhasi *et al.* (2004), meios porosos com baixa condutividade hidráulica são mais suscetíveis à diminuição de k por, dano de formação, que meios porosos com alta condutividade hidráulica inicial.

Segundo Gray e Rex (1966) a explicação para a dispersão das argilas seria que uma certa proporção das lâminas de mica de camada mista e cristais de caulinita crescem nas superfícies de outros minerais, como o quartzo. Esses cristais de argila seriam mantidos somente por forças de van der Waal e a atração elétrica de laços compartilhados por cátions bivalentes, como o cálcio. A substituição de cátions bivalentes pelos monovalentes da solução, os quais são fortemente hidrolisáveis, faz com que as superfícies de silicato tornem-se mutuamente repulsivas por causa de sua forte carga negativa (FOSTER, 1955). Esta repulsão mútua é sugerida para fornecer as pressões necessárias para dispersar as partículas e mantê-las em suspensão em um estado de solução. Segundo, Azari e Leimkuhler (1990), em um arenito onde Ca^{+2} (cálcio) e Mg^{+2} (magnésio) estão inicialmente nos locais de troca das argilas, as plaquetas de argila não se dispersam em água doce. Por outro lado, quando uma solução de NaCl atravessa o solo, o Na^{+} (sódio) torna-se o cátion dominante nos locais de troca entre as lâminas aumentando a tendência de dispersão das argilas. Segundo Gawel (2006), a agregação do solo é destruída pela introdução de grandes quantidades de íons de sódio. As altas

concentrações de sódio causam desequilíbrio na capacidade de troca de cátions e promovem um estado de dispersão. Quando a agregação é destruída pelo sódio, ocorre a dispersão das partículas do solo.

O fenômeno de dispersão das argilas, que explica parte do dano de formação e redução da permeabilidade, é dependente tanto das características do solo quanto da solução percolante. McNeal e Coleman (1966) descobriram que o aumento da razão de adsorção de sódio ou *Sodium Absorption Ratio* (SAR) e a diminuição da concentração de eletrólitos da solução percoladora induzem uma diminuição da condutividade hidráulica do solo. A Razão de Adsorção de Sódio (SAR) pode ser definida pela equação 6:

$$SAR = \frac{Na}{\sqrt{\frac{Mg+Ca}{2}}} \quad (6)$$

Onde as concentrações dos cátions são representadas em mmol L⁻¹.

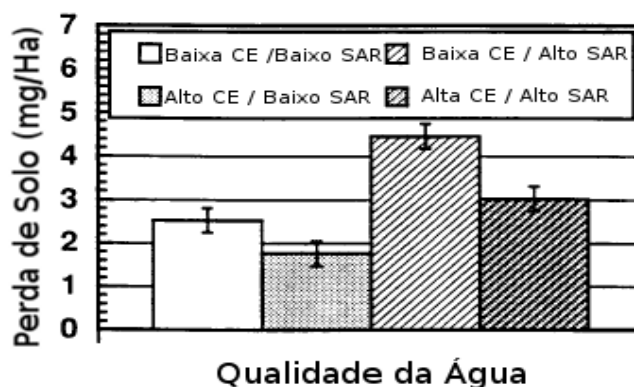
Segundo McNeal *et al.* (1966), a diminuição da condutividade hidráulica foi mais pronunciada em solos contendo silicatos de camada 2:1 expansíveis, especialmente as montmorilonitas, do que nos solos contendo caulinita ou sesquióxidos. Apesar disto, o fenômeno da dispersão também ocorreu em argilas com menor atividade (grupo 1:1).

Felhendler *et al.* (1974) descobriram que a dispersão de argila em solos com baixo teor de silte era mais acentuada do que em solos com atividade similar e mineralogia da argila semelhante, mas com maior teor de silte. Velasco-Molina *et al.* (1971) descobriram que os solos mortmorilloníticos e os solos micáceos se dispersam mais em soluções de sal fracas com baixos valores de SAR do que os solos caulíníticos-halloysíticos com alto teor de óxido de ferro. Frenkel *et al.* (1978) concluíram que, embora os solos montmorilloníticos sejam as condições mais sensíveis às condições sódicas, os solos caulíníticos neutros e os solos vermiculíticos também são sensíveis a condições sódicas com baixa concentração eletrolítica.

Pupisky e Shainberg (1979) realizaram ensaios de coluna utilizando uma areia argilo-siltosa da região da costa de Israel e concluíram que a expansão da argila não é a causa direta e principal da diminuição da condutividade hidráulica em solos poucos sódicos. Por outro lado, a dispersão e o movimento das partículas de argila que podem então bloquear os poros

condutores são provavelmente os principais mecanismos que controlam a condutividade hidráulica do solo. A dispersão das partículas de argila só é possível quando a concentração da solução do solo cai abaixo de uma concentração limite em que as plaquetas de argila floculam. Segundo Lentz *et al.* (1994) a dispersão do solo em corpos de prova percolados com água com baixo nível de condutividade elétrica (CE) e alto SAR é 177% maior que com corpos de prova com baixa CE e baixo SAR. A dispersão do solo em corpos de prova percolados com água com alta CE e baixo SAR foi 70% menor que corpos de prova com alta CE e baixo SAR. A Figura 4.6 apresenta um resumo da influência da composição da água na quantidade de solo perdida por dispersão.

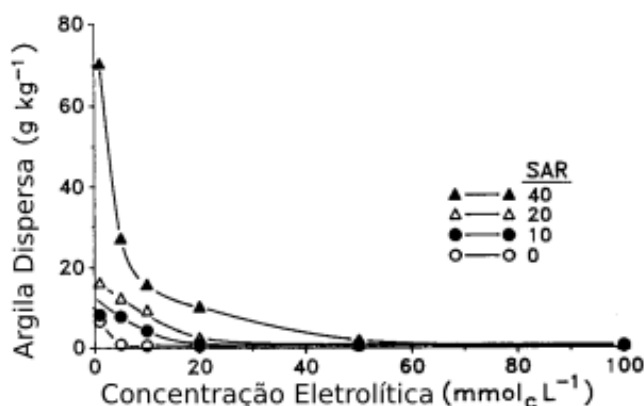
Figura 4.6: Influência geral da composição da água na perda de solo



Fonte: Lentz *et al.* (1994)

Curtin *et al.* (1994) realizaram ensaios utilizando amostras de solo denominado Haploborolls, variando de areia argilosa a argilas, compactadas em permeâmetros e percoladas com soluções de misturas de $\text{CaCl}_2\text{-NaCl}$, com SAR determinados (0, 2.5, 5, 10, 20 e 40) e concluíram que o aumento da sodicidade aumenta substancialmente a dispersão, particularmente em baixas concentrações de eletrólitos. A Figura 4.7 apresenta o gráfico da dispersão da argila em função da concentração eletrolítica dos fluidos para diferentes SAR. Todas as soluções com concentração eletrolítica igual a 100 mmol/L, ainda que possuam diferentes valores de SAR, permanecem agregadas. Por outro lado, em soluções com concentração eletrolítica menor, a medida que o SAR da solução aumenta, nota-se o aumento da quantidade de argila dispersa.

Figura 4.7: Gráfico de Dispersão da Argila em relação à Concentração Eletrolítica para fluidos com diversos SAR



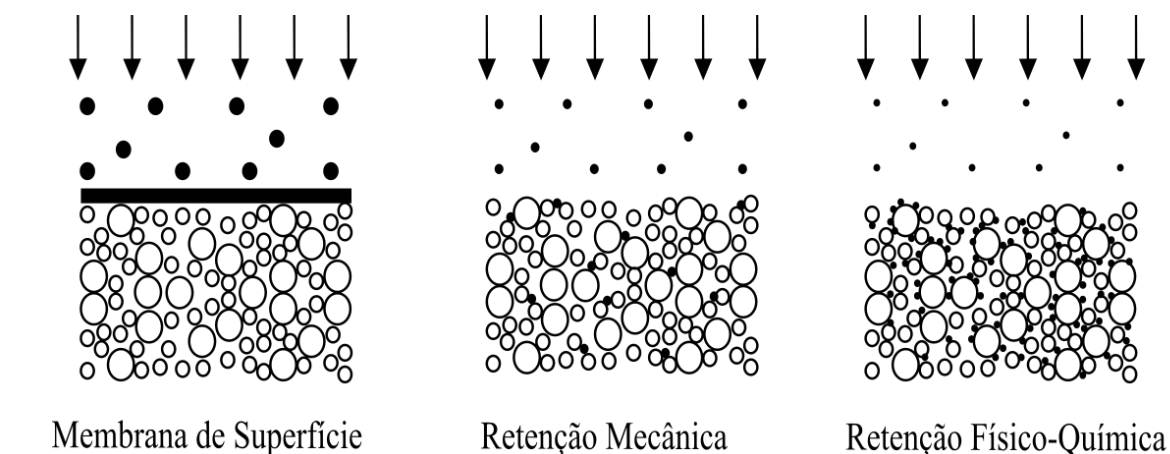
Fonte: Curtin *et al.* (1994)

4.3.2.2. Redução da Condutividade Hidráulica Por Filtração das Partículas em Suspensão

Além da obstrução dos poros devido à dispersão da fração de argila apresentada no item anterior, pode ocorrer a obstrução dos poros pelas partículas em suspensão contidas no fluido percolante. Este fenômeno também está relacionado com a migração de contaminantes, que será abordada no capítulo 4.5.

Quando as partículas em suspensão são maiores que o tamanho dos poros do meio, a acumulação destas partículas pode formar uma membrana de superfície. Quando as partículas são de tamanhos menores que a abertura dos poros, ocorre a migração e estas partículas acabam presas ao longo do meio poroso. Este fenômeno é chamado de retenção mecânica. Quando as partículas suspensas são muito pequenas comparadas ao tamanho dos poros, a retenção ocorre somente por adsorção das partículas à superfície das partículas do solo, o que é chamado de retenção físico-química. Diversos estudos realizados com água residual (TIEN e PAYATAKES, 1979; YAO *et al.*, 1971; TOBIASON e O'MELIA, 1988) indicaram que a concentração da partícula em suspensão, o tamanho das partículas, tamanho dos poros, a velocidade do fluxo e as forças químicas e eletrostáticas são os parâmetros que mais influenciam na ocorrência de filtração nos meios porosos. Os esquemas de mecanismos de filtração estão apresentados na Figura 4.8:

Figura 4.8: Esquema de mecanismos de filtração de partículas suspensas



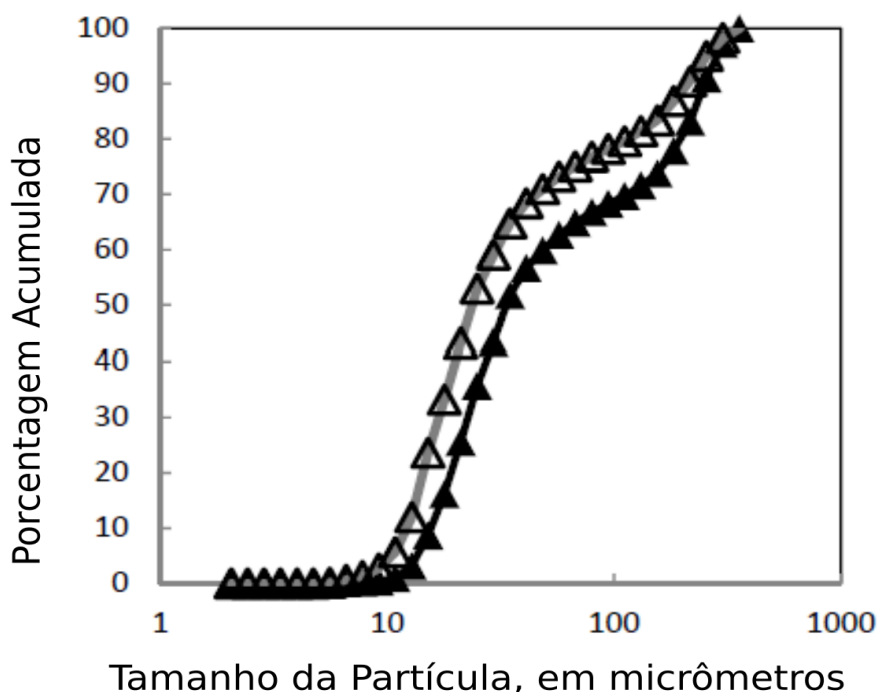
Ao serem percolados fluidos que contêm partículas orgânicas e inorgânicas suspensas através de um meio poroso, tais partículas podem ser depositadas ao longo da camada devido aos mecanismos apresentados anteriormente. Assim, ao longo do tempo, haverá um acúmulo de partículas em suspensão que contribuem para uma redução no espaço de poros disponível para o fluxo de fluido dentro do solo contribuindo para uma redução na porosidade e, conseqüentemente, na condutividade hidráulica.

No caso da água de produção da indústria do petróleo, é possível considerar os hidrocarbonetos como a principal classe de partículas suspensas causadora da obstrução por filtração em uma camada de solo. O óleo presente na água de produção pode ser classificado em duas fases: óleo disperso que significa o óleo na água produzida sob a forma de pequenas gotículas, que podem variar de submicrometros a centenas de microns; e óleo dissolvido que significa óleo na água produzida em uma forma solúvel. Os hidrocarbonetos alifáticos em geral têm uma solubilidade muito baixa em água. São os hidrocarbonetos aromáticos, junto a substâncias como ácido orgânico que formam a maior parte do óleo dissolvido.

Durante o derramamento de óleo superficial, a formação de gotículas ocorre como resultado da ruptura mecânica ou química de uma mancha de óleo em pequenas gotículas dispersas. A dispersão de óleo natural é influenciada principalmente por processos mecânicos que são regidos por fatores físicos como o vento, as correntes e as ondas (ZHONG e YOU, 2011). Trudel *et al.* (2010) mostraram que um óleo menos viscoso produz gotículas muito pequenas (faixa de 8-37 μm) enquanto outros óleos viscosos produziram gotículas maiores

(60-73 μm). Espera-se que grandes gotículas atinjam a superfície da água de forma bastante rápida, enquanto pequenas gotas de óleo podem permanecer na coluna de água por longos períodos de tempo (Atlas e Hazen, 2011; Baelum *et al.*, 2012; Hazen *et al.*, 2010). Segundo experimento de Yapa *et al.* (2012), gotículas com diâmetros de 5 a 6 mm sobem à superfície de forma bastante rápida dentro de algumas horas, enquanto as gotículas de tamanho de sub-micron levam muito mais tempo para subir à superfície e as gotículas que são menores que 100 μm são mais prováveis de se tornar flutuantes, estando sujeitas ao transporte advectivo. Segundo Chen *et al.* (2009), o diâmetro médio das gotas de óleo dispersas em água varia de 120 μm a 20 μm dependendo da energia imposta. A fase dispersa geralmente é a fase que provoca a formação de superfície de filtração, pois possui diâmetro médio maior que o diâmetro dos poros da maioria dos solos. Na Figura 4.9 é apresentada a distribuição de tamanho de partículas de duas amostras de fluido coletados em derramamento de óleo.

Figura 4.9: Distribuição de tamanho de partícula para sedimentos em suspensão

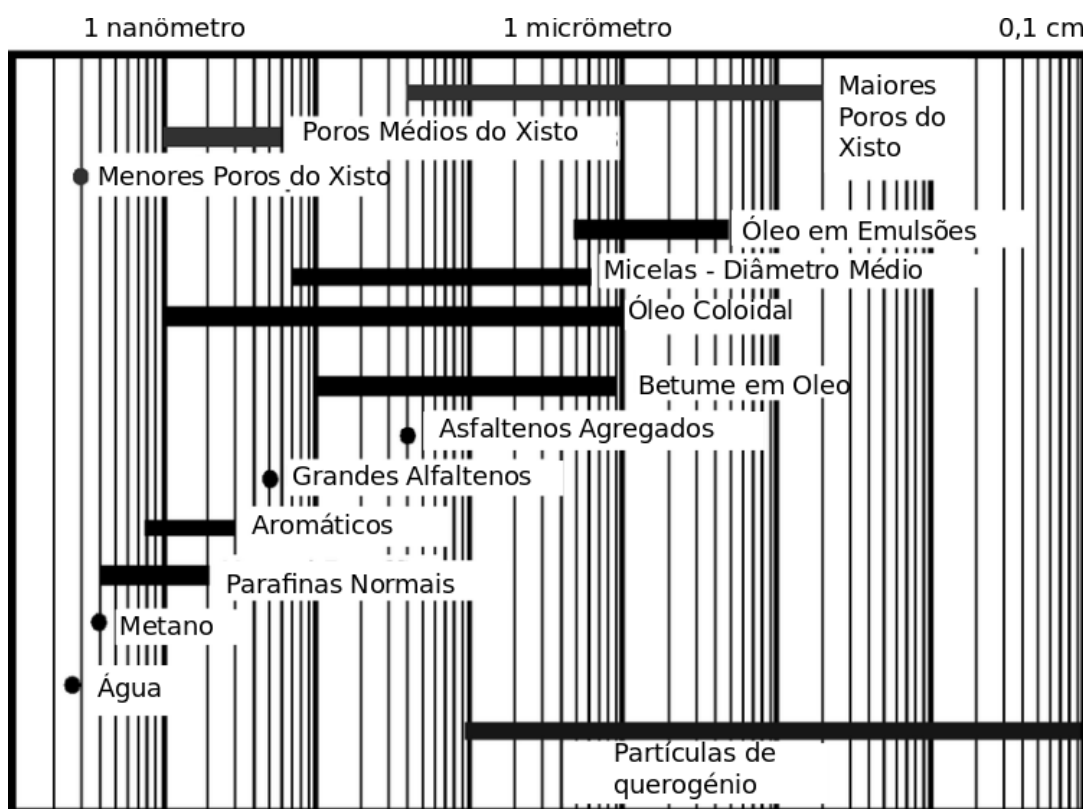


Fonte: Fitzpatrick *et al.*, (2015)

A fase dissolvida é responsável, na maioria das vezes, tanto pela retenção mecânica quanto pela retenção físico-química. Como nesta fase o tamanho das partículas é menor do

que o tamanho da maioria dos poros do solo, ocorre o transporte destas ao longo da coluna de solo. Neste caso, parte das partículas pode ficar retida nos poros menores do solo por obstrução mecânica e parte, geralmente de menor tamanho, pode ser atraída pela superfície das partículas do solo por forças de adsorção. Na Figura 4.10 está apresentado um gráfico onde Momper (1978) faz uma comparação entre o tamanho das partículas de hidrocarbonetos e o tamanho dos poros do xisto.

Figura 4.10: Comparação do tamanho dos poros de xisto com o tamanho da molécula de hidrocarboneto.



Fonte: Momper (1978)

4.3.2.3. Redução de Condutividade Hidráulica Por Obstrução Biológica

A mudança de condutividade hidráulica e porosidade de um meio poroso saturado devido ao crescimento da biomassa bacteriana é conhecida como bio-obstrução ou *bioclogging*. A biomassa microbiana responsável pela obstrução, e conseqüentemente redução

da porosidade, é composta por células bacterianas e substâncias poliméricas extracelulares produzida pelas bactérias.

Cunningham et al. (1991), Holm (2000), Taylor e Jaffé (1990a) e Vandevivere e Baveye (1992c) estudaram o *bioclogging* em laboratório e observaram redução significativa da condutividade hidráulica, relacionada ao acúmulo de biomassa nos poros.

Vandevivere *et al.* (1995) sugerem assumir que a biomassa cresça não só como um biofilme, mas também sob a forma de microcolônias, o que pode proporcionar um melhor acordo entre dados experimentais e simulações.

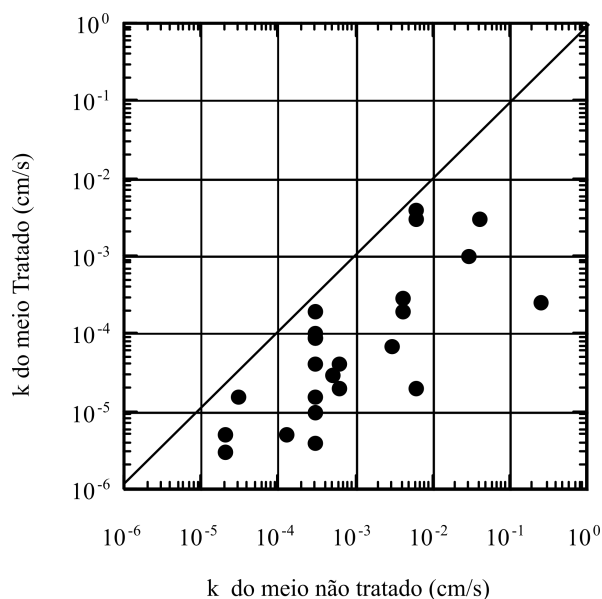
Vandevivere e Baveye (1992c) e Taylor e Jaffé (1990a) operaram colunas com taxas de fluxo constantes. Eles observaram reduções de condutividade hidráulica de até três ordens de grandeza, que foram correlacionadas com um aumento no carbono orgânico bacteriano e redução da porosidade. Cunningham *et al.* (1991) realizaram ensaios de permeabilidade a carga constante. Eles observaram o crescimento homogêneo de um biofilme que reduziu a porosidade do meio entre 50 a 96%. A condutividade hidráulica diminuiu entre 92 e 98%.

Holm (2000) investigaram o *bioclogging* em colunas de areia operadas em fluxo constante. Observou-se uma diminuição da condutividade hidráulica de mais ou menos três ordens de grandeza. Esta diminuição se correlacionou com o aumento das células bacterianas e do carbono orgânico total (TOC).

Shackelford e Jefferis (2000) sugerem as seguintes pontuações a partir dos estudos de Dennis e Turner (1998) (Figura 4.11):

- Os valores finais de condutividade hidráulica $<10^{-7}$ cm/s geralmente não foram relatados.
- A estimulação contínua de nutrientes não parece ser necessária para manter o valor reduzido de condutividade hidráulica,
- O biofilme pode crescer até espessuras suficientes para preencher completamente os poros,
- O biofilme aumenta a difusividade e pode afetar a adsorção fortemente, e
- As propriedades físicas do biofilme podem variar amplamente dependendo da espécie bacteriana e da composição da morfologia e exopolissacarídeos.

Figura 4.11: Condutividade hidráulica (k) de meios porosos antes e após o tratamento com bactérias



Fonte: Dennis e Turner (1998) apud Shackelford e Jefferis (2000)

4.4. Propriedades Hidráulicas de Solos Não Saturados

4.4.1. Curva De Retenção

A Curva de retenção representa a relação existente entre a quantidade de fluido presente nos poros do solo e sua respectiva sucção. Esta quantificação pode ser expressa em termos de teor de umidade gravimétrico (w), teor de umidade volumétrico (θ) ou grau de saturação (S_r). Como a pressão na água intersticial é normalmente negativa para o caso dos solos não saturados (menor que a atmosférica), a sucção é normalmente definida como a diferença entre a pressão de ar (u_a) e a pressão positiva da água (u_w):

$$\psi_m = u_a - u_w \quad (7)$$

Segundo Sousa (2012), a relação funcional entre o teor de líquido presente nos poros e a pressão capilar, denominada de curva de retenção, encerra informações imprescindíveis para descrição matemática do fluxo em meio poroso. Sua utilização vai desde a resolução de problemas de fluxo transiente até a agricultura para determinação da capacidade de campo e

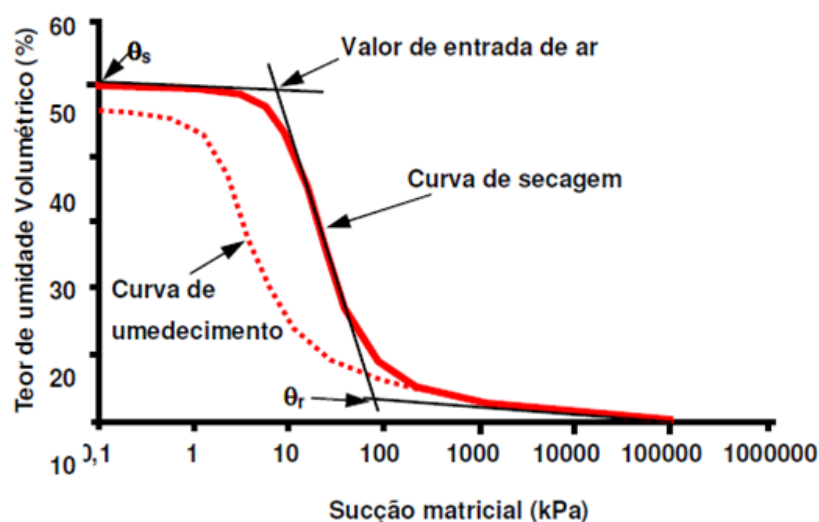
do ponto de murcha. Na geotecnia a curva de retenção tem sido utilizada para previsão da resistência ao cisalhamento e da curva de condutividade hidráulica dos solos não saturados.

Em conteúdos baixos de umidade, o potencial da água dos poros é relativamente baixo quando comparado com o da água livre e a sucção correspondente é elevada. Para conteúdos elevados de umidade, a diferença entre o potencial da água dos poros e o potencial da água livre diminui e a sucção correspondente é relativamente baixa. Quando o potencial da água dos poros é igual ao potencial da água livre, a sucção é zero. (MONCADA, 2008)

Na maioria das vezes, a Curva de retenção apresenta uma forma de S e possui como principais parâmetros: teor de umidade volumétrica residual (θ_r), teor de umidade volumétrica saturado (θ_s); sucção de entrada de ar (ψ_b) e capacidade de retenção específica ($\Delta\psi/\Delta\theta$).

Segundo Fredlund e Xing (1994), o valor de entrada de ar de um solo é o valor da sucção matricial a partir do qual o ar começa a entrar nos vazios maiores do solo. O teor de umidade residual é o conteúdo de umidade a partir do qual é necessária uma grande variação de sucção para remover mais água do solo, ou, o valor de umidade a partir do qual aumentos de sucção não produzem variações significativas no conteúdo de umidade. Fredlund e Xing (1994) indicam que é possível determinar o teor de umidade residual e o valor de entrada de ar a partir do traçado de tangentes à curva, como está apresentado na Figura 4.12.

Figura 4.12: Curva de retenção típica – Solo Siltoso



Fonte: Moncada (2008) modificado de Fredlund e Xing (1994)

Dentre os principais fatores que influenciam na forma da curva de retenção, podem ser citados o tipo de solo (estrutura e agregação), o teor de umidade inicial, o índice de vazios, a textura, a mineralogia, a história de tensões e os métodos de compactação (VANAPALLI *et al.*,1999B).

Enquanto areia e pedregulhos perdem grande parte da umidade com a imposição de pequenos valores de sucção, argilas tendem a perder muito menos água. Este fenômeno pode ser explicado pela dimensão dos poros na estrutura dos solos: nas argilas a quantidade de microporos é muito superior, existindo forças capilares atuando na retenção da água. Além disto, a área superficial desbalanceada eletricamente das argilas é muito maior do que dos solos grossos o que permite que uma quantidade maior de água seja adsorvida à superfície da argila.

Aubertin *et al* (1998) apresentaram faixas de variação do valor de entrada de ar (ψ_b) de acordo com o tipo de solo. Esses valores são apresentados na Tabela 4.2.

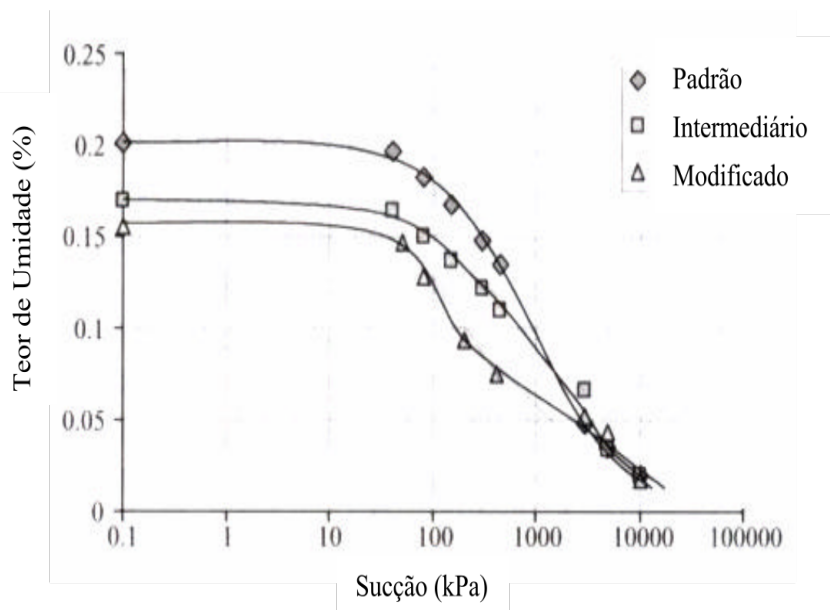
Tabela 4.2: Faixa de Variação da Sucção de Entrada de Ar

Tipo de Solo	Sucção de Entrada de Ar (kPa)
Areia Grossa	0,2 – 1,0
Areia Média	1,0 – 3,5
Areia Fina	3,5 – 7,5
Silte	7,5 - 25
Argila	> 25

Fonte: Modificado de Aubertin *et al.* (1998)

Segundo Reichert *et al.* (2009), o histórico de tensões, os métodos de compactação e índices de vazios são fatores que afetam mais os macroporos do solo, alterando a curva de retenção para baixas sucções. Quanto à história de tensões, Barbour (1998), sugerem que quanto maior a tensão de pré-adensamento, mais elevado é o valor de entrada de ar. Segundo Tinjum *et al.* (1997), valor de entrada de ar é geralmente maior e a inclinação da curva é menos íngreme para amostras compactadas com energia de compactação maior. Resultados semelhantes de Leong e Rahardjo (2002) podem ser observados na Figura 4.13

Figura 4.13: Efeito da energia de compactação na curva de retenção



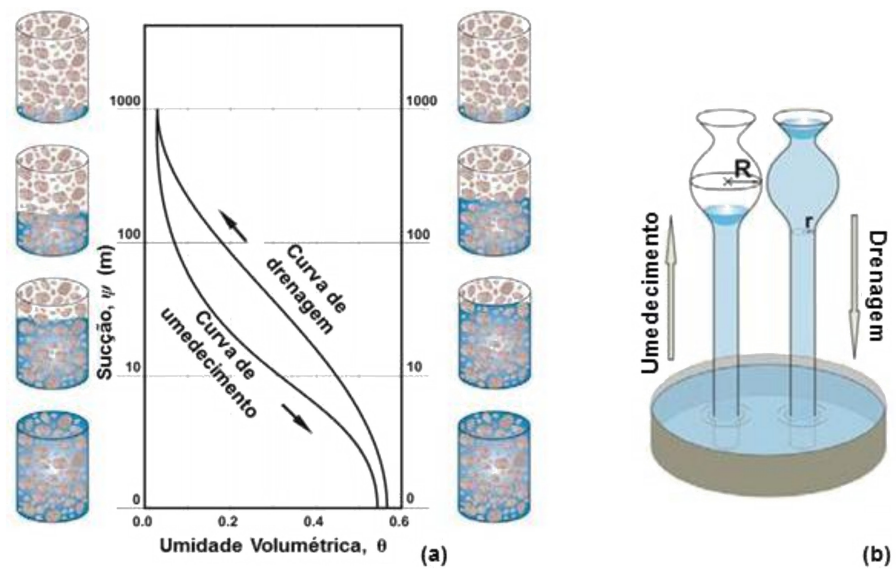
Fonte: Feuerhamel (2003) modificado de Leong e Rahardjo (2002)

A respeito da energia de compactação empregada, o aumento desta torna o solo mais denso, ou seja, o volume de vazios maiores é reduzido, fazendo com que os poros de dimensão intermediária aumentem (poros maiores transformam-se em intermediários) e quase não haja alteração nos microporos (GERSCOVICH, 2001). No Brasil, Marinho e Stuermer (2000) chegaram a resultados similares estudando a influência da energia de compactação na forma da curva de retenção de um solo residual de gnaíse.

Além dos fatores citados é também de grande importância a trajetória seguida, podendo ser de secagem ou umedecimento, já que a curva de retenção apresenta histerese. No processo de umedecimento, a curva de retenção tende a apresentar, para o mesmo valor de umidade, sucções inferiores às observadas em um processo de secagem.

O fenômeno de histerese está representado na 4.14, onde na Figura (b) é possível verificar o efeito *Ink Bottle*: o valor maior de umidade é referente ao processo de drenagem, pois a sucção é regulada pelo valor de r (menor raio), enquanto que o maior valor de R dificulta a ascensão capilar.

Figura 4.14: Histereses da curva de retenção (a) e efeito tinteiro atuante na histerese (b)



Fonte: Sousa (2012)

4.4.1.1. Equações para Modelagem de Curvas de Retenção

Diversas equações foram propostas na literatura para modelagem das Curvas de Retenção. Em geral, essas equações são restritas a certos tipos de solos, com um formato particular de Curva de retenção, ou faixas limitadas de sucções (Vanapalli *et al.*, 1996). Segundo Gerscovich *et al.* (2004) muitos modelos se baseiam no pressuposto de que a curva depende da distribuição de tamanho de grãos e, a curva pode ser estimada diretamente da distribuição de tamanhos de grãos e das propriedades físicas do solo. Entretanto, tentativas de modelagem da curva de retenção a partir da curva granulométrica não condizem frequentemente com resultados obtidos experimentalmente.

Dentre os modelos para a curva de retenção mais usuais destacam-se os de Van Genuchten (1980) e Fredlund e Xing (1994).

Van Genuchten (1980) apresentou uma classe de funções para a representação da curva de retenção, equação 8, de maneira análoga ao modelo estabelecido para coeficiente de permeabilidade $k(\psi)$, que será apresentado posteriormente.

$$\theta(\psi) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha \psi)^n]^m} \quad (8)$$

Onde:

θ_s e θ_r são os conteúdos de umidade volumétrico saturado e residual, respectivamente;

α e n são parâmetros de ajuste;

m é dado pela equação 9:

$$m = 1 - \frac{1}{n} \quad (9)$$

Segundo van Genuchten (1980), o valor de α é aproximadamente o inverso do valor de entrada de ar.

O modelo de van Genuchten (1980), para o caso de solos argilosos, com altos valores de θ_r , não modela a curva de retenção em pontos próximos à secagem completa do solo. Neste âmbito, Fredlund e Xing (1994) partem da distribuição granulométrica do solo para

obter uma equação que descreva a variação da sucção com o conteúdo de umidade volumétrica. Com este modelo, e considerando que o valor de sucção correspondente a um teor de umidade zero é igual a 1×10^6 kPa, eles propuseram a Equação (10):

$$\theta(\psi, \alpha, n, m) = C(\psi) + \frac{\theta_s}{\ln\left[e + \left(\frac{\psi}{\alpha}\right)^{n m}\right]} \quad (10)$$

Com:

$$C(\psi) = 1 - \frac{\ln\left(\frac{\psi}{\psi_R}\right)}{\ln\left(\frac{10^6}{\psi_R}\right)} \quad (11)$$

Onde:

α , m e n são parâmetros de ajuste sendo que:

α está relacionado o valor de entrada de ar do solo;

$$m = 3,67 \ln\left(\frac{\theta_s}{\theta_i}\right)$$

$$n = 3,72 \psi_i \left(\frac{1,31^{(m+1)}}{(m \theta_s)} \right)$$

$e = 2,718$;

θ_s é a umidade volumétrica saturada;

θ_r é a sucção em condições residuais.

Estudos realizados por Gerscovich *et al* (2004) mostraram que os modelos propostos por van Genuchten (1980) e Fredlund e Xing (1994) são os que melhor se ajustam aos solos brasileiros, além do modelo proposto por Gardner (1958), não abordado neste trabalho.

Apesar da extensa utilização dos modelos de van Genuchten (1980) e Fredlund e Xing (1994) em relação aos demais modelos de ajuste disponíveis, em alguns casos, estes não se ajustam adequadamente a solos com distribuição bimodal de poros, isto é, solos que apresentam duas classes de poros distintas, sendo classificados em poros estruturais e texturais. Diante disto, diversos autores propuseram adaptações aos modelos preexistentes, como no caso do modelo denominado de Duplo van Genuchten (CADUCCI *et al.*, 2010).

Este modelo utiliza uma variação do modelo de van Genuchten (1980) adotando um platô intermediário, ou seja, valor do conteúdo de água que se observa ligeiramente constante ao redor do ponto de murcha permanente. A equação que caracteriza este modelo está apresentada a seguir:

$$\theta(\psi) = \theta_r + \frac{(\theta_{pmp} - \theta_r)}{(1 + [\alpha_{text} \psi]^{(n_{text})})^{(m_{text})}} + \frac{(\theta_{sat} - \theta_{pmp})}{(1 + [\alpha_{est} \psi]^{(n_{est})})^{(m_{est})}} \quad (12)$$

Onde:

θ_s é o conteúdo de umidade volumétrico saturado;

θ_r é o conteúdo de umidade volumétrico residual;

θ_{pmp} é o conteúdo de umidade volumétrico intermediário ou do patamar;

α_{est} , m_{est} e n_{est} (estrutural) corresponde aos parâmetros α , m e n relativos ao primeiro segmento da curva

α_{tex} , m_{tex} e n_{tex} (textural) corresponde aos parâmetros α , m e n relativos ao segundo segmento da curva

os valores de m para cada segmento continuam sendo calculado pela equação 9, como no modelo de van Genuchten (1980).

4.4.1.2. Técnicas para Determinação de Curva de retenção

Para obter a Curva de retenção de água completa de um solo é necessário utilizar vários métodos, já que nenhum método consegue cobrir toda a faixa de variação de sucção satisfatoriamente. Usualmente os métodos utilizados para medir sucção são divididos em dois grupos: diretos e indiretos. Métodos diretos são aqueles em que a sucção é medida diretamente e os métodos indiretos são aqueles em que esta é medida através de um parâmetro ou propriedade do solo. A placa de sucção, a centrífuga, o tensiômetro e o aparelho de membrana de pressão constituem alguns métodos diretos e entre os métodos indiretos estão o dessecador e o papel-filtro (FEUERHAMEL, 2003). Em linhas gerais, pode-se seguir a seguinte recomendação na escolha dos métodos: até sucções de 70kPa, utilizar a placa de sucção ou tensiômetros convencionais; de 30 até 300kPa utilizar a placa de pressão (ou um transdutor de alta capacidade de sucção). Para valores maiores de sucção, a utilização do

método de papel filtro ou de transdutores de alta capacidade tem-se mostrado adequados (VILLAR, 2000; MONCADA, 2002; OLIVEIRA, MARINHO, 2004; MARINHO, 1997).

A Tabela 4.3 apresenta uma relação das técnicas comumente utilizadas relacionando-as com os tipos de sucção possíveis de se obter, a faixa limite de sucção e as referências.

Tabela 4.3: Técnicas de medição de sucção

Técnica	Sucção matricial	Sucção Osmótica	Sucção Total	Limite (kPa)
Psicrômetro		x	x	100 a 80.000
Papel Filtro em Contato	x			30 a 300.000
Papel Filtro sem Contato			x	30 a 300.000
Placa de Sucção	x			0 a 90
Prato de Pressão	x			0 a 1.500
Tensiômetro	x		x	0 a 90 0 a 1000
Translação de Eixos	x			0 a 1.500
Condutividade Elétrica	x	x		Todos os Intervalos
Reflectômetro de Domínio do Tempo	x			0 a 200
Dessecador de Vácuo			x	1.000 a 1.000.000

Fonte: Adaptado de Feuerhamel (2003)

4.4.1.3. Porosimetria a partir de curva de retenção

Para o cálculo da capilaridade costuma-se utilizar a Equação de Laplace para um menisco capilar de forma genérica. A equação 13 descreve o cálculo da sucção.

$$u_a - u_w = T_s \cdot \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (13)$$

Onde

T_s é a tensão superficial do fluido;

R_1 e R_2 os raios de curvatura ortogonais ao menisco (L);

Assumindo-se o menisco como esférico, tem-se então as equações 14 e 15:

$$R_1 = R_2 = \frac{r}{\cos(\alpha_p)} \quad (14)$$

Onde:

α_p o ângulo de contato (ou molhamento).

$$u_a - u_w = 2 \cdot T_s \cdot \frac{\cos(\alpha_p)}{r} \quad (15)$$

Onde

r é o raio equivalente do poro (L)

Marshall (1958) apud Souza (2014), apresentou uma relação direta entre sucção matricial e distribuição dos poros do solo. A equação 16 reescreve a equação 15 em função do tamanho do diâmetro dos poros.

$$D = \frac{4T_s}{u_a - u_w} \quad (16)$$

De acordo ao tamanho dos poros, é possível numa análise rápida, dividir o solo com duas categorias de poros, os macroporos e os microporos. Para Cardoso (1995), na distribuição dos poros em solos argilosos compactados, os microporos são função da estrutura intraagregados (grumos) e os macroporos constituem os vazios interagregados.

4.4.2. Condutividade Hidráulica Em Meio Não Saturados

A Lei de Darcy, citada na seção 4.3, foi concebida para fluxo em solos saturados, sendo ampliada por Edgar Buckingham (1907) para o fluxo não saturado. Segundo Buckingham (1907) a condutividade hidráulica não saturada seria função do conteúdo de água ou da sucção no solo. Quando se introduz a relação de dependência entre condutividade e umidade na lei de Darcy para descrever o fluxo em solos não saturados esta lei passa a ser chamada de lei de Buckingham-Darcy (Equação 17).

$$v = -k(\theta) \frac{dh}{ds} \quad (17)$$

Onde:

v é a velocidade linear média do fluido, velocidade de descarga ou vazão unitária em (L/T);

dh/ds é o gradiente do potencial hidráulico, i ;

$k(\theta)$ condutividade hidráulica não saturada, em função da umidade volumétrica (L/T).

Diferente do que ocorre no fluxo em solos saturados, nos solos não saturados a água não possui toda a área de vazios para fluir, o que reduz o valor da condutividade hidráulica. A variação da condutividade hidráulica com a umidade ou sucção é denominada de curva de condutividade hidráulica.

A expressão formulada por Richards (1928) para fluxo unidimensional em meio poroso não saturado está apresentada na Equação 18.

$$\frac{\partial}{\partial z} \left\{ k(\theta) \cdot \left(1 - \frac{1}{\rho_w g} \frac{\partial \psi_m}{\partial z} \right) \right\} = \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (18)$$

Onde:

θ é a umidade volumétrica (L³/L³);

ψ_m potencial matricial (M/LT²);

t é o tempo (T)

ρ_w é a massa específica da água (M)

g é a aceleração da gravidade (L/T²)

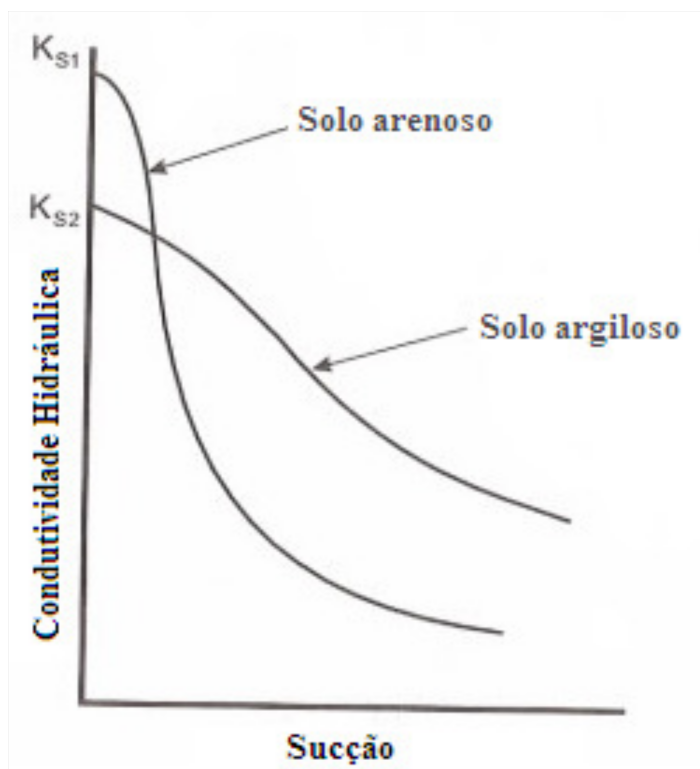
z o potencial gravitacional (L).

A equação de Richards permite avaliar a distribuição umidade do solo em condições gerais, podendo ser utilizada sob as mais diferentes formas e, a depender da técnica de solução numérica empregada. Dessa forma, o fluxo de água em solos não saturados pode ser descrito através de variáveis não lineares relacionadas: a umidade volumétrica (θ) ou grau de

saturação (S_r) ou umidade gravimétrica (w), a sucção matricial (ψ_m) e a condutividade hidráulica (k) (Fredlund e Rahardjo, 1993).

Segundo Dias (2012), a variação da condutividade hidráulica com o grau de saturação depende das propriedades geométricas dos canais através dos quais a água se move. Os primeiros poros a se esvaziarem na dessaturação são os grandes poros, ficando o fluxo cada vez mais restrito aos poros menores. Dessa maneira, solos que apresentem canais de fluxo maiores (solos granulares) tendem a drenar mais rapidamente, acarretando uma queda mais acentuada no valor da condutividade hidráulica com incrementos na sucção do que em solos finos, que apresentam grande quantidade de microporos. Os microporos retêm água por força de capilaridade mantendo o fluxo contínuo nestes pequenos canais.

Figura 4.15: Função da condutividade para solo arenoso e argiloso



Fonte: Dias (2012)

Como o índice de vazios e a textura também estão relacionados à distribuição dos poros é possível concluir que, ao contrário do que acontece na condição saturada onde um grande índice de vazios e a presença de poros largos garantem alta condutividade hidráulica

saturada, na condição não saturada, quando maior o índice de vazios e o tamanho dos poros mais facilmente a drenagem destes poros. Este fenômeno facilita a entrada de ar no solo e reduzindo a área de fluxo contínuo, ou seja, reduzindo a condutividade hidráulica.

O uso de solos com diferentes propriedades hidráulicas em barreiras capilares é um exemplo de aplicação prática do conceito de condutividade hidráulica não saturada. Segundo Lima (2015), barreiras capilares são coberturas evapotranspirativas que consistem de um sistema de solos em camadas que envolvem, normalmente, um solo fino (silte, argila) colocado sobre um material granular (areia, pedregulho, geotêxtil não tecido). Barreiras capilares usam o contraste nas propriedades hidráulicas entre o solo fino e o material granular para ampliar a capacidade da camada de solo fino em armazenar água. O contraste das propriedades hidráulicas causa o fenômeno chamado ruptura capilar. Este fenômeno é observado na interface entre solos finos com poros relativamente pequenos e materiais granulares que tenham poros relativamente grandes. O efeito de ruptura capilar previne que uma quantidade de água flua do solo fino para dentro de um solo granular até se alcançar uma sucção crítica próxima a zero. Nesse ponto, a água é capaz de romper a resistência e migrar dos poros menores para os poros maiores. Essa sucção crítica, conhecida como sucção de passagem (*breakthrough suction*), geralmente ocorre quando a condutividade hidráulica dos dois materiais não saturados atinge o mesmo valor (ZORNBERG *et al.*, 2009).

4.4.2.1. Métodos para Determinação de Condutividade Hidráulica Não Saturada

Para determinar a função de condutividade hidráulica não saturada foram desenvolvidos diversos métodos que se dividem em experimentais (resultados diretos a partir de ensaios) e preditivos (relações empíricas entre a função condutividade e a curva de retenção de umidade do solo ou suas propriedades volume-massa).

Métodos Experimentais

Os métodos experimentais podem ser divididos em métodos de campo e laboratoriais e em métodos transientes e permanentes.

A maioria dos métodos permanentes para determinação da condutividade hidráulica não saturada é similar aos métodos usados para determinação de condutividade hidráulica saturada. Os ensaios consistem na aplicação de fluxo ou gradiente hidráulico constante ao

solo. No primeiro caso (fluxo constante), mede-se a sucção e, no segundo (gradiente hidráulico constante), mede-se a taxa de fluxo, para, então, determinar-se a condutividade hidráulica não saturada por meio da lei de Darcy. (DIAS, 2012)

Nos métodos transientes a condutividade hidráulica é determinada através de soluções analíticas que descrevem o fluxo transiente ou aplicando a lei de Darcy através de diferenças finitas, já que em espaços de tempo muito pequenos a condição se aproxima da permanente.

A maior vantagem dos métodos transientes, em relação à determinação em regime permanente, é o tempo necessário para a execução dos ensaios. Salienta-se contudo a inexistência de dados consistentes comparando os valores obtidos com estes ensaios com os obtidos por ensaios em regime permanente (GARDNER, 1956; FUJIMAKI e INOUE, 2003).

Na Tabela 4.4, estão apresentados alguns métodos transientes e permanentes de determinação da função da condutividade hidráulica:

Tabela 4.4: Métodos para determinação da função de condutividade hidráulica

Regime de Fluxo	Método	Autores
Permanente	Tradicional	Richards (1931)
	Centrífugo	Nimmo <i>et al.</i> (1987); Conca e Wright (1992); Dell'Avanzu (2006); McCartney e Zornberg (2005)
	Fluxo Constante	Olseb (1966); Olsen <i>et al.</i> (1985); Aiban e Znidarcic (1989); Znidarcic <i>et al.</i> (1991); ; Likos <i>et al.</i> (2005)
Transiente	Sorção	Klute e Dirksen (1986)
	Absorção	Bruce e Klute (1956)
	Térmico	Globus e Gee (1995)
	Fluxo de Saída	Gardner (1956); Doering (1965) e Salehzadeh e Demond (1994)
	Perfil Instantâneo	Richards e Weeks (1953); Hamilton <i>et al.</i> (1981); Daniel (1983); Chiu e Shackelford (1998)
	Centrífuga de pequena escala	Reis <i>et al.</i> (2011); Sterck (2011)

Fonte: Dias (2012) baseado em informações de Benson e Gribb (1997) e Masrouri *et al.* (2008); Reis *et al.* (2011) e Sterck (2011).

Métodos Preditivos

Como uma alternativa para a determinação da função da condutividade hidráulica através dos métodos diretos ou experimentais, foram desenvolvidos modelos matemáticos para estimar a variação da condutividade hidráulica em função da sucção matricial e da curva de retenção.

A utilização de métodos preditivos tem sido mais comum que a de métodos experimentais, já que estimativas confiáveis da condutividade hidráulica não saturada através de experimentos são difíceis de obter, em parte devido à variabilidade em campo e ao tempo e custos altos dos ensaios laboratoriais. Na prática, em vez de realizar experimentos diretos, utilizam-se modelos baseados na curva de retenção para se prever a função de condutividade não saturada. Neste modelos se assume que o solo é constituído de uma série de poros interconectados cuja distribuição de tamanhos é caracterizada pelo formato da curva de retenção.

Segundo Mualem (1986) três tipos de modelos são utilizadas para descrever a função de permeabilidade: equações empíricas, modelos macroscópicos e modelos probabilísticos. Estas categorias indicam o grau de sofisticação teórica aplicado a cada método, sendo os modelos estatísticos os mais sofisticados. Na Tabela 4.5 estão apresentados alguns modelos que descrevem a função de condutividade hidráulica de solos não saturados.

Tabela 4.5: Equações do Modelos para determinação da função de condutividade hidráulica

Autores	Equação Modelo	Parâmetros
Richards (1931)	$k(\psi) = \alpha \psi + b$	a e b: parâmetros de ajuste
Gardner (1958)	$k(\psi) = k_{sat} e^{-\alpha \cdot \psi}$	a: parâmetro de ajuste
Brooks e Corey (1964)	$k(\psi) = k_{sat}$, para $\psi \leq \psi_b$	ψ_b : valor de entrada de ar
	$k(\psi) = k_{sat} \left(\frac{\psi}{\psi_b}\right)^{-n}$, para $\psi \geq \psi_b$	n: parâmetro de ajuste
Campbell (1974)	$k(\psi) = k_{sat} \left(\frac{\theta}{\theta_{sat}}\right)^n$	n: parâmetros de ajuste
Van Genuchten (1980)	$k(\psi) = k_{sat} \frac{[1 - (\alpha \psi)^{n-1} [1 + (\alpha \psi)^n]^{-m}]^2}{[1 + (\alpha \psi)^n]^{m/2}}$	a, m, n: parâmetros de ajuste m = 1 - 1/n

Fonte: Fonte: Dias (2012)

4.5. Mecanismos do Transporte de Solutos em Solos

O conhecimento do mecanismo de transporte de massa nos solos é de fundamental importância para o entendimento do comportamento da água de produção em uma bacia de contenção durante um vazamento.

O transporte de soluto em solos pode ser definido como o movimento dos compostos dissolvidos na água através dos poros do solo. Este dependerá das características da solução (densidade, concentração, polaridade, solubilidade, cossolvência, volatilidade, pH, potencial iônico, teor e finura de sólidos em suspensão), do solo (teor e tipo de matéria orgânica, distribuição granulométrica, mineralogia e teor de finos, distribuição de vazios, capacidade de troca catiônica, permeabilidade e grau de saturação) e do ambiente (temperatura, existência de micro-organismos, pressão, tempo).

Os mecanismos fundamentais de transporte de poluentes em solos são classificados em físicos, químicos e biológicos e serão descritos em seguida.

4.5.1. Processos Físicos

Os principais processos físicos que influem no transporte de soluções miscíveis em meios porosos saturados são a advecção e a dispersão hidrodinâmica, resultado da dispersão mecânica e difusão molecular. Tais processos ocorrem simultaneamente e somente em poucos casos (solos com muito baixos valores de condutividade hidráulica) se verifica o predomínio da difusão molecular. (BASSO, 2004)

4.5.1.1. Advecção

A advecção é definida como o transporte de matéria em solução ou suspensão com o movimento do fluido. O escoamento ocorre em razão da força de gravidade, sendo retardado pela viscosidade e pelo atrito de contato entre o fluido e os sedimentos associados (DOMENICO e SCHWARTZ, 1998). Considerando-se somente este mecanismo, a alteração da concentração da solução em um ponto seria abrupta, de 0 a 100%, e a taxa de transporte do soluto seria diretamente relacionada com a velocidade real da água no meio poroso (SHACKELFORD, 1993). A equação que modela este tipo de transporte é a equação

diferencial do transporte por advecção (fluxo unidimensional), considerando o caso de v_s constante:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -v_s \cdot \frac{\partial C}{\partial x} \quad (19)$$

Com:

$$v_s = \frac{k}{n} \cdot i \quad (20)$$

Onde:

C = concentração do soluto (M/L^3);

v_s = velocidade média nos poros (L/T);

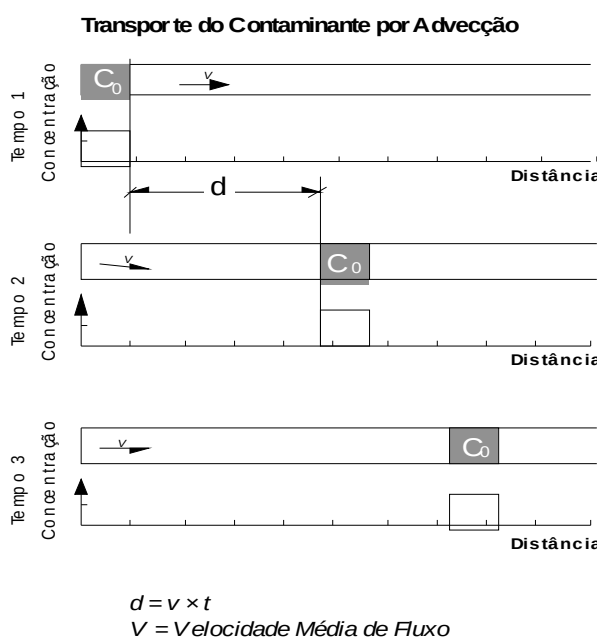
k = condutividade hidráulica (L/T);

n = porosidade;

i = gradiente hidráulico.

Na Figura 4.16 é mostrada a representação conceitual do transporte de contaminante por advecção.

Figura 4.16: Representação conceitual do transporte de contaminante por advecção



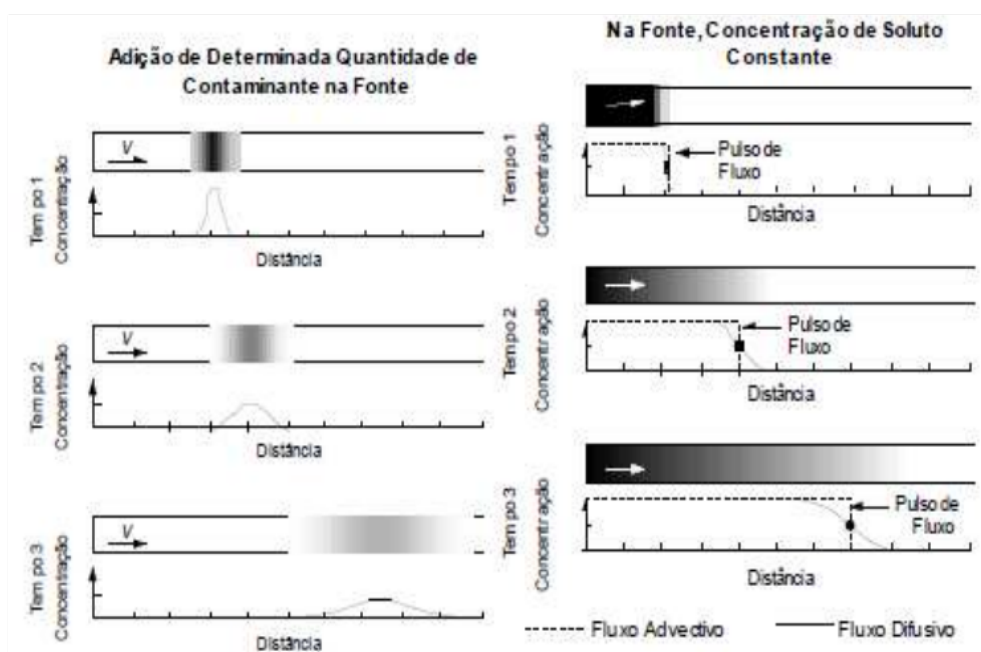
Fonte: Machado (2010)

4.5.1.2. Dispersão Hidrodinâmica

Segundo Freeze e Cherry (1979), o fenômeno da dispersão hidrodinâmica seria a tendência ao espalhamento do soluto pelos caminhos que ele percorre no solo. O resultado do espalhamento implica a ocupação maior do volume do contaminante comparado a quando ocorre apenas o fenômeno de advecção. Neste caso a concentração diminui, ao passo que a frente de contaminação tem sua velocidade aumentada, embora neste caso haja uma transição mais suave nos valores de concentração da substância de interesse.

A Dispersão Hidrodinâmica pode ocorrer por dois motivos: pela diferença de concentração do soluto (Difusão Molecular) ou em função da variação da velocidade de percolação ao passar pelos poros e canais tortuosos do solo (Dispersão Mecânica) (Figura 4.17).

Figura 4.17: Representação conceitual do transporte de contaminante por dispersão



Fonte: Machado (2010)

A dispersão mecânica (D_m) e o coeficiente de difusão molecular efetivo (D_f), utilizado para meios porosos e dependente do coeficiente de tortuosidade, representam as parcelas do coeficiente de dispersão hidrodinâmica (D_h):

$$D_h = D_m + D_f \quad (21)$$

Difusão Molecular

A difusão molecular é o processo no qual os constituintes iônicos e moleculares se movem na direção contrária do gradiente de concentração. Uma vez estabelecido o gradiente, as moléculas e íons tendem a se deslocar das regiões de maior concentração para as de menor concentração, visando ao equilíbrio de acordo com a Figura 4.17. O transporte difusivo ocorre mesmo na ausência de fluxo hidráulico (Freeze e Cherry, 1979). A difusão do soluto é proporcional ao gradiente de concentração e pode ser expressa pela Lei de Fick:

$$J_d = D_0 \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial^2 x} \quad (22)$$

Onde:

J_d é o Fluxo de massa por difusão de soluto (M/L²T);

D_0 = Coeficiente de difusão molecular em solução (L²/T);

C = Concentração do soluto (M/L);

$\partial^2 C / \partial^2 x$ = Gradiente de concentração

Nos meios porosos, devido à tortuosidade das trajetórias de fluxo, a difusão é menor que em uma solução livre, sendo necessário usar o coeficiente de difusão molecular efetivo, D_f :

$$D_f = \omega \cdot D_0 \quad (23)$$

Onde:

ω = coeficiente de tortuosidade, $\omega < 1$.

Para difusão em materiais porosos saturados, utiliza-se a forma modificada da Primeira Lei de Fick descrita por Shackelford (1993) que, já considerando o coeficiente de difusão molecular efetiva, é dada por:

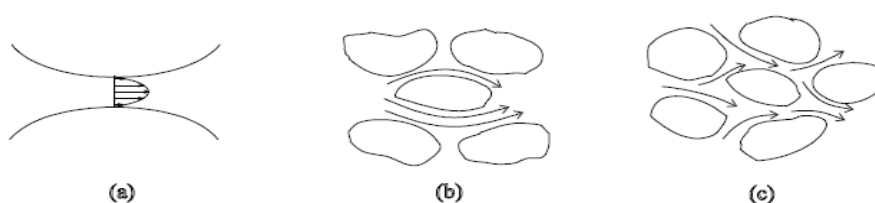
$$Jd = -Df \cdot n \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial^2 x} \quad (24)$$

Onde n é a porosidade do meio poroso

Dispersão Mecânica

A variação de velocidade em canais individuais, o desenvolvimento de velocidades médias diferentes em canais diferentes, decorrentes das variações das dimensões dos poros ao longo das linhas de fluxo e o desvio da trajetória das partículas em decorrência da tortuosidade, reentrâncias e interligações entre os canais implica uma mistura mecânica da solução (BEAR, 1972). Esta mistura mecânica causa um espalhamento do poluente. Os três fenômenos descritos anteriormente são ilustrados na Figura 4.18.

Figura 4.18: Mecanismos de dispersão ou mistura mecânica, a) Mecanismos de dispersão ou mistura mecânica, b) dispersão em canais individuais, c) tortuosidade, reentrâncias e interligações



Fonte: Moncada (2004)

Estes três fenômenos fazem com que o soluto seja transportado tanto na direção do fluxo do fluido, o qual será chamado de dispersão longitudinal, quanto na direção perpendicular ao fluxo, denominado de dispersão transversal:

$$Dm = \alpha_s \times v_s \quad (25)$$

Onde:

α_s é o coeficiente de dispersividade na direção considerada

v_s é a velocidade linear média na direção considerada (L/T).

O fluxo unidimensional de massa de uma dada espécie química pelo mecanismo de dispersão mecânica é descrito por Shackelford (1993) na equação:

$$Jm = - Dm \cdot n \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial^2 x} \quad (26)$$

Onde:

Jm é o fluxo de dispersão mecânica (M/L²T);

Dm é o coeficiente de dispersão mecânica função da velocidade de linear média v (L²/T).

n é a porosidade

Influência De Cada Processo Na Dispersão Hidrodinâmica

O Número de Peclet (Pe) é utilizado para identificar a componente de maior influência nos processos de transporte de solutos em meios porosos e pode ser calculado a partir da equação 27.

$$Pe = v_s \cdot \frac{L}{D_h} \quad (27)$$

Onde:

Pe = número de Peclet;

L = comprimento da coluna de solo (L);

D_h = coeficiente de dispersão hidrodinâmica (L²/T);

v_s = velocidade linear média da água subterrânea (L/T).

Valores de P_e inferiores ou iguais a 1 indicam influência dominante do processo de difusão, e valores acima ou iguais a 50 indicam predomínio da advecção aliada à dispersão mecânica (SHACKELFORD, 1994).

4.5.2. *Processos Bio-físico-químicos*

Estes processos envolvem interações bio-físico-químicas que podem retardar ou acelerar a migração de um elemento químico pelo meio poroso ou em alguns casos implicar a degradação ou o decaimento de efeitos nocivos do mesmo ao longo do tempo. Dependem da constituição química do soluto, ou seja, se são reativos ou não, orgânicos ou inorgânicos, dos seus constituintes, das características do solo e do pH do sistema.

4.5.2.1. Retardamento ou Aceleração

São fenômenos que influenciam no retardamento ou na aceleração: a sorção hidrofóbica, a precipitação ou dissolução, a co-solvência, a complexação, a ionização, além dos fenômenos apresentados na seção 4.3.2.2: a formação de membrana superficial, retenção mecânica e retenção físico-química (ou adsorção / dessorção).

Adsorção / Dessorção

A adsorção é um dos processos mais importantes no transporte de solutos em meios porosos. Trata-se de um processo físico-químico no qual uma substância é acumulada numa interface entre fases. Quando substâncias contidas em um líquido se acumulam numa interface sólido-líquido, denomina-se adsorvato, a substância que está sendo removida da fase líquida e adsorvente, a fase sólida na qual a acumulação ocorre (BOSCOV, 1997).

De maneira geral, a primeira camada da substância é adsorvida por troca iônica, e as demais são atraídas por forças de Van der Waals (YONG *et al.*,1992). A atração para a superfície devida às forças de Van der Waals é relativamente fraca e chamada de adsorção física.

Na adsorção química, as ligações entre o sorvido e o sorvente são do tipo covalente, fortes, e acabam incorporando o soluto à superfície das partículas do solo. Muitos solos e sedimentos possuem superfícies carregadas negativamente e a solução íons carregados

positivamente (ex: cátions em geral) que, por meio da adsorção, produzem a troca de íons e a retenção no solo, que está relacionada à propriedade do solo denominada de capacidade de troca catiônica (CTC). Para esse tipo de adsorção, as moléculas adsorvidas não se movem livremente sobre a superfície do sólido, não sendo um processo facilmente reversível, mas o soluto poderá ser removido com o aumento da temperatura. (MARQUES, 2012)

Segundo LaGrega *et al.* (1994), a adsorção é o principal mecanismo de retenção de metais em solução, enquanto que é apenas um dos mecanismos de retenção de substâncias orgânicas que são sensíveis a outros processos.

Formação De Membrana Superficial

Além de substâncias dissolvidas, a água subterrânea contaminada muitas vezes contém partículas em suspensão, que podem ser o próprio poluente, como bactérias ou pó pouco solúvel, ou conter substâncias poluentes sorvidas, como no caso de metais ou compostos orgânicos sorvidos em grãos de argila ou matéria orgânica coloidal (DOMENICO e SCHWARTZ, 1990).

Quando a água, ao se infiltrar no solo, já contém partículas em suspensão, parte do material suspenso fica retido na superfície, pois as partículas maiores que a abertura dos poros não conseguem penetrar no solo (DOMENICO e SCHWARTZ, 1990). Forma-se, assim, uma membrana que dificulta tanto a percolação quanto a entrada de partículas finas no solo (KOVÁCS, 1981).

Retenção Mecânica

As partículas de maior interesse para o estudo do transporte são as que estão na faixa de dimensões menores e estão dissolvidas no fluido principal, por possuírem maior mobilidade através da malha de poros do solo. Estas partículas dissolvidas conseguem ser transportadas ao longo do meio poroso até que encontram poros de menor dimensão, ocorrendo a retenção mecânica da partícula.

Fator Retardamento (R_d) E Coeficiente De Distribuição (K_d):

O fenômeno de retardamento está representado pelo fator de retardamento (R_d) que é um coeficiente adimensional e representa a velocidade relativa do fluxo em relação à velocidade do soluto reativo, conforme a Equação 28:

$$R_d = \frac{v_s}{v_R} \quad (28)$$

Onde:

v_s é a velocidade linear média do fluido no meio poroso (L/T);

v_R é a taxa média de migração do centro de massa de uma dada espécie química (L/T).

Para constituintes reativos, o fator de retardamento é maior que 1 ($R_d > 1$), assim a equação (29) indica que o soluto adsorvido é transportado a uma taxa reduzida em relação a solutos não adsorvidos. Já para constituintes não reativos as velocidades se anulam e o valor de R_d torna-se igual a 1. (BASSO, 2003)

O valor de R_d pode ser determinado, no caso mais simples como sendo linear e reversível, em função do Coeficiente de Distribuição (k_d):

$$R_d = 1 + \frac{\rho_d K_d}{\theta} \quad (29)$$

Onde:

θ = Teor de umidade volumétrico,

ρ_d = Densidade do solo seco [M/L³];

K_d = Coeficiente de partição ou distribuição água/solo [L³/M].

Nestes casos, K_d pode ser representado pela equação 30 e pode ser obtido a partir do traçado de isotermas, que correlacionam a concentração da substância nas partículas sólidas, S , com a concentração na solução, C , em condições de equilíbrio, conforme apresenta a Figura 4.19

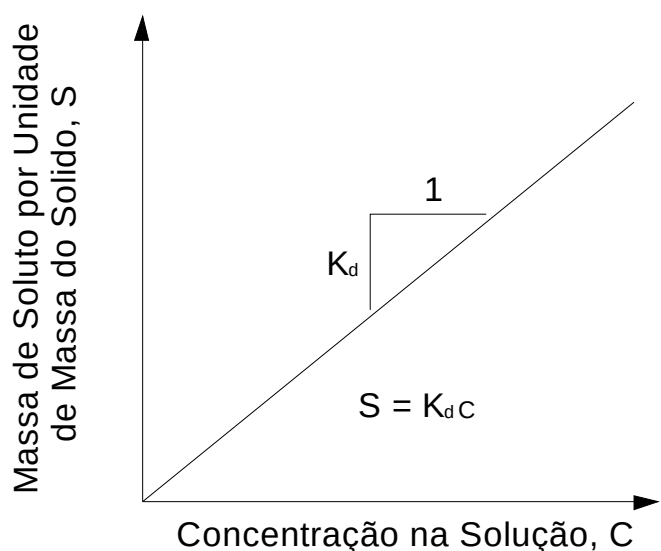
$$S = K_d \cdot C \quad (30)$$

Onde:

S = Massa de soluto removido da solução por unidade de massa de sólido (M/M) ,

C = Concentração de equilíbrio do soluto (massa de soluto por unidade de volume de poros percolado (M/L³)).

Figura 4.19: Isoterma linear, aproximação razoável para baixas concentrações de contaminante

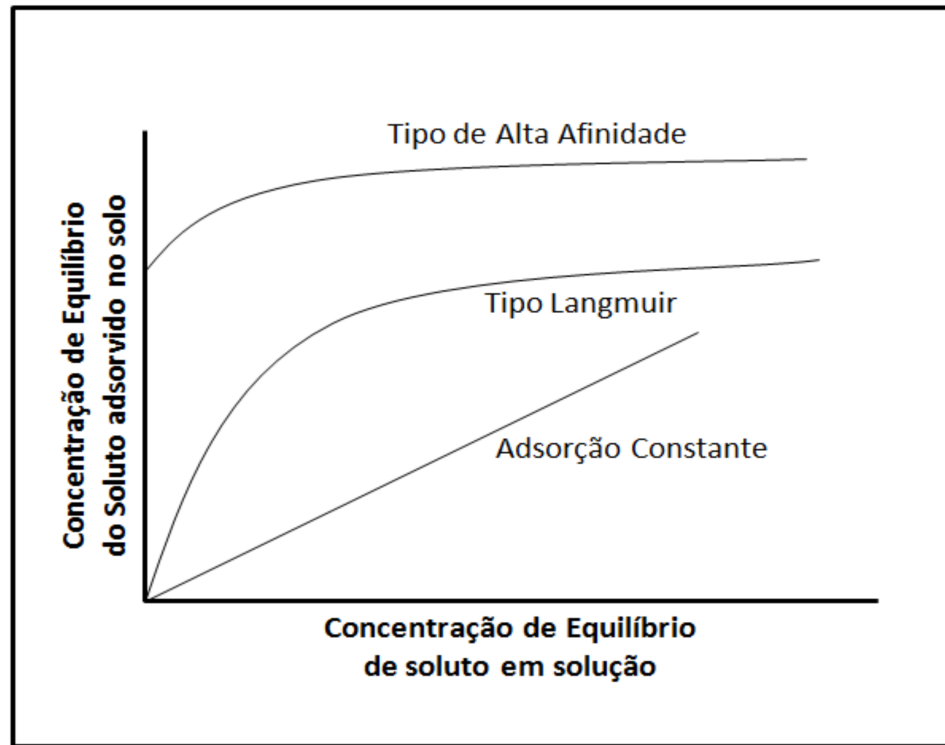


Baixas Concentrações de Contaminante

Fonte: Machado (2010)

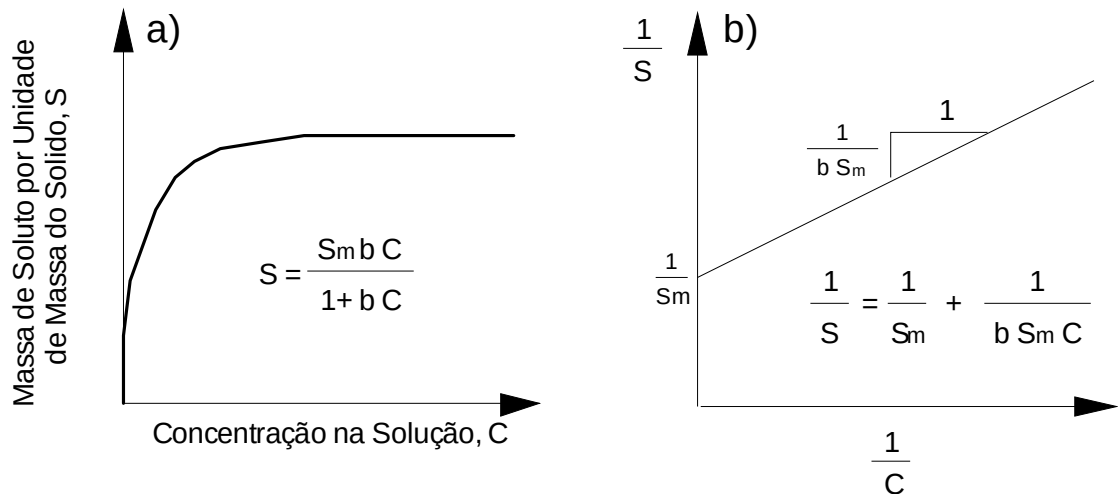
Em casos onde há concentrações altas do soluto, a relação entre S e C é não linear . As relações mais utilizadas para descrever o processo de adsorção são as isotermas de Langmuir e Freundlich. A Figura 4.20 apresenta tais tipos de curvas e a Figura 4.21 apresenta a linearização da Isotherma de Langmuir para obtenção dos parâmetros que influem no transporte de contaminantes.

Figura 4.20: Isotherma clássica de Adsorção mostrando os tipos de adsorção linear, de Langmuir e Alta Afinidade.



Fonte: Almeida (2015) adaptado de Yong *et al.* (1992)

Figura 4.21: Isotherma de Langmuir, a) Gráfico mostrando a adsorção como função da concentração, b) Gráfico utilizado para determinar os parâmetros.



Fonte: Machado *et al.*, (2010)

4.5.2.2. Efeitos de Degradação ou Decaimento

Os efeitos de degradação ou decaimento podem ser produzidos por diversos mecanismos, como volatilização, hidrólise, oxidação ou redução, metabolização ou biodegradação e decaimento radioativo.

A volatilização pode ser definida como um mecanismo difusivo pelo qual um composto passa ao estado gasoso desde o estado líquido. Segundo van Genuchten e Simunek (1996), ainda que no passado a maioria das substâncias químicas poluentes eram não voláteis, hoje se reconhece o fenômeno como importante na caracterização da migração de poluentes como pesticidas e outros produtos químicos orgânicos.

A hidrólise é definida como a reação da substância com as moléculas de água. É frequentemente descrita como sendo uma troca de um grupo aniônico X da substância por uma hidroxila (OH⁻), resultando na decomposição da substância.

A oxidação e a redução são reações químicas nas quais as moléculas envolvidas mudam de valência através de ganho ou perda de elétrons. A perda de elétrons implica a oxidação da molécula e o ganho de elétrons caracteriza a redução. No meio ambiente, tais reações podem ser controladas por microrganismos que não participam da reação, mas agem como catalisadores. Estes microrganismos obtêm energia através da oxidação de compostos orgânicos, hidrogênio ou formas reduzidas inorgânicas de ferro, nitrogênio e enxofre. Para que estas reações ocorram, são necessários receptores de elétrons, que em condições aeróbias, pode ser o oxigênio, enquanto que, em condições anaeróbias, são nitratos, sulfatos e dióxido de carbono (FETTER, 1993; FREEZE e CHERRY, 1979 APUD MONCADA, 2004).

Segundo Basso (2003), o decaimento radioativo é decorrente de um processo espontâneo que ocorre em alguns isótopos de elementos (radioativos) resultando na liberação de energia e formação de outros isótopos, causando a diminuição da concentração dos primeiros no solo.

A metabolização decorre da degradação biológica (ou biodegradação), que consiste na transformação de moléculas orgânicas em outras menores, como consequência da atividade metabólica de microrganismos presentes no solo. A energia necessária para o seu metabolismo é suprida pela degradação de substâncias ricas em energia, transformando-as em metabólitos de menor energia e, por fim, em CO₂ e H₂O (MATTHESS, 1994 APUD MONCADA, 2004). Alexander e Scow (1989) fizeram uma revisão sobre algumas equações utilizadas na

representação da cinética da biodegradação. Essas equações são: equação de ordem zero, de primeira ordem, logística, logarítmica, tipo Monod, Michaelis-Menton, etc. Um resumo destas equações está apresentada na Figura 4.22

Segundo van Genuchten e Simunek (1995), embora a maioria das expressões tenha bases teóricas, elas são comumente usadas apenas de forma empírica, ajustando as equações aos dados observados. A equação de ordem zero e de primeira ordem são as mais popularmente utilizadas para descrever a biodegradação de compostos orgânicos basicamente devido à simplicidade e facilidade de serem incorporadas nos modelos de transporte de solutos.

Figura 4.22: Equações de Degradação Biológica

Modelo Cinético	Equação	Variáveis
Primeira Ordem	$\mu = -k_1 \cdot C$	k_1 = constante empírica
Ordem Zero	$\mu = -k_1$	μ_{\max} = coeficiente máximo de degradação
Monod, Michaelis-Menton	$\mu = -\mu_{\max} \cdot \frac{C}{(K_s + C)}$	K_s = concentração de substrato quando o coeficiente de degradação é a metade do máximo
Monod com Crescimento	$\mu = -\mu_{\max} \cdot \frac{C}{(K_s + C)} \cdot (C_0 + X_0 - C)$	C_0 = concentração inicial X_0 = concentração necessária para crescimento da população
Logística	$\mu = -k_L \cdot C (C_0 + X_0 - C)$	K_L = constante que reflete a supressão do crescimento da população por excesso de concentração
Logarítmico	$\mu = -\mu_{\max} (C_0 + X_0 - C)$	

Fonte: van Genuchten e Simunek (1996)

4.5.3. Ensaios De Coluna

Este ensaio consiste em percolar a solução do contaminante, através de uma coluna preenchida com solo indeformado ou solo compactado. O efluente é recolhido periodicamente para a determinação da sua concentração. Neste método, mantém-se a concentração da fonte constante, enquanto anotam-se os volumes percolados e as concentrações das substâncias de interesse para a determinação da curva de chegada ou *breakthrough curve*, na literatura inglesa. A curva de chegada ilustra os mecanismos de transporte de contaminantes predominantes e o processo de atenuação do contaminante pelo solo. Os gráficos são apresentados pela concentração relativa C/C_0 (concentração no reservatório de coleta/concentração inicial) versus número de volumes de poros percolados (V_p) ou tempo (t). (ALMEIDA, 2015)

Utilizando os ensaios de coluna é possível a obtenção dos parâmetros de transporte que governam a migração de contaminantes no solo (D_h , R_d , entre outros); avaliação dos efeitos de reações químicas e biológicas e modelar ou validar os modelos que definem a migração de contaminantes.

4.5.4. Soluções Analíticas Para Migração De Contaminantes

Van Genuchten (1981) define a equação diferencial parcial que descreve o transporte químico unidimensional sob condições transitórias de fluxo de fluido é tomada como:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\theta \cdot D_h \cdot \frac{\partial C}{\partial x} - v_s \cdot C \right) - \frac{\partial}{\partial t} (\theta \cdot C + \rho_d \cdot S) = \mu_w \cdot \theta \cdot C + \mu_s \cdot \rho_d \cdot S - \gamma_w \cdot \theta - \gamma_s \cdot \rho_d \quad (31)$$

Onde:

C é a concentração da solução (M/L³)

S é a concentração adsorvida (M/L³)

θ é a umidade volumétrica

D_h é o coeficiente de dispersão hidrodinâmica (L²/T)

v_s é a velocidade do fluxo nos poros (L/T)

ρ_d é a densidade do meio poroso seco (M/L³)

t é o tempo (T)

μ_w e μ_s são constantes de decaimento das fases líquidas e sólidas respectivamente
 γ_w e γ_s são constantes de produção das fases líquidas e sólidas respectivamente

Van Genuchten (1981) limita a aplicação das soluções analíticas aos casos onde ocorre o transporte durante equilíbrio iônico e a isoterma geral de adsorção é descrita por uma equação linear (ou linearizada) da forma:

$$S = K_d \cdot C \quad (32)$$

Quando o teor de umidade volumétrica e o fluxo volumétrico permanecem constantes no tempo e no espaço (fluxo de estado estacionário), a equação geral de transporte é dada por:

$$Dh \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - v_s \frac{\partial C}{\partial x} - Rd \frac{\partial C}{\partial t} = \mu C - \gamma \quad (33)$$

Onde:

v_s é a velocidade da água nos poros

Algumas soluções analíticas são apresentadas em van Genuchten (1981) considerando diversas condições de contorno e iniciais além de considerar colunas finitas e semi-infinitas. As equações governantes e as condições iniciais e de contorno associadas são agrupadas em três categorias: Categoria A, onde na equação de transporte governante não tem termos de produção e de decaimento ($\mu = \gamma = 0$); Categoria B, para produção de ordem zero somente ($\gamma \neq 0$; $\mu = 0$); e categoria C, para produção simultânea de ordem zero e decaimento de primeira ordem ($\gamma \neq 0$; $\mu \neq 0$). Nenhuma categoria especial foi dada para os modelos em que a equação de transporte tem apenas um termo de decaimento de primeira ordem ($\gamma = 0$; $\mu \neq 0$), porém, as soluções analíticas para esses casos seguem imediatamente as da categoria C simplesmente colocando $\gamma = 0$ nas várias expressões.

Nesta dissertação, para a modelagem da curva de chegada em solos que não apresentaram queda na concentração do percolado ao decorrer do ensaio, será utilizada como

modelo inicial a equação A.1 (LAPIDUS e AMUNDSON 1952, OGATA e BANKS 1961), dada por:

$$\frac{C}{C_0} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{Rd \cdot x - v_s \cdot t}{2 \cdot (Dh \cdot Rd \cdot t)^{1/2}} \right) + \frac{1}{2} \exp \left(\frac{v_s \cdot x}{Dh} \right) \cdot \operatorname{erfc} \left(\frac{Rd \cdot x + v_s \cdot t}{2 \cdot (Dh \cdot Rd \cdot t)^{1/2}} \right) \quad (34)$$

Para os ensaios que apresentaram decaimento, será utilizada a C.5 da categoria C (VAN GENUCHTEN 1981; BEAR 1972), dada por:

$$\frac{C}{C_0} = \frac{1}{2} \exp \left(\frac{(v_s - u) \cdot x}{2 \cdot Dh} \right) \cdot \operatorname{erfc} \left(\frac{Rd \cdot x - u \cdot t}{2 \cdot (Dh \cdot Rd \cdot t)^{1/2}} \right) + \frac{1}{2} \exp \left(\frac{(v_s + u) \cdot x}{2 \cdot Dh} \right) \cdot \operatorname{erfc} \left(\frac{Rd \cdot x + u \cdot t}{2 \cdot (Dh \cdot Rd \cdot t)^{1/2}} \right) \quad (35)$$

Onde:

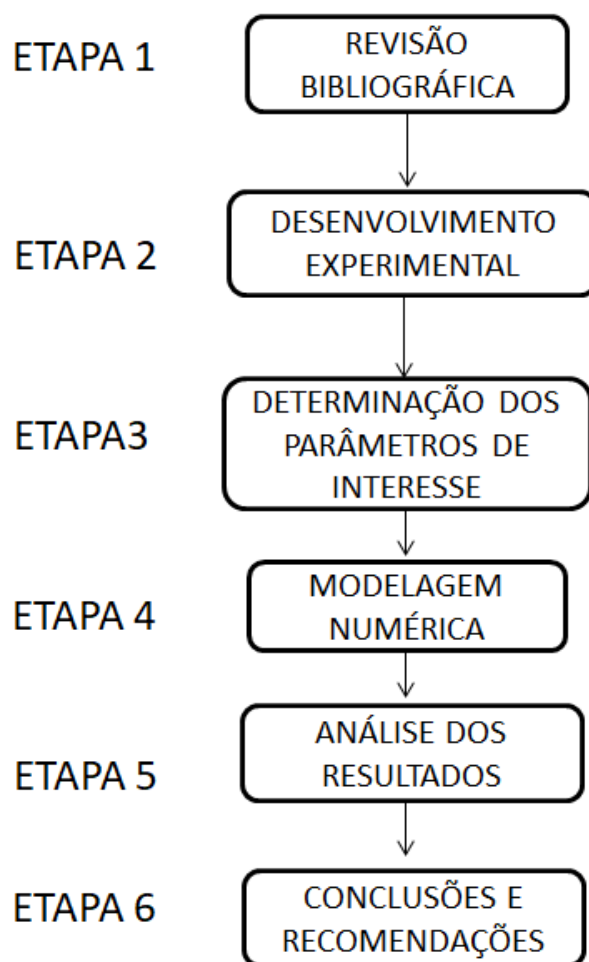
$$u = v_s \left\{ 1 + \frac{4 \cdot \mu \cdot Dh}{v^2} \right\}^{1/2} \quad (36)$$

5. METODOLOGIA DE PESQUISA

Neste capítulo são descritos os procedimentos experimentais propostos para atingir os objetivos desta dissertação. São apresentados aqui o delineamento da pesquisa e o detalhamento do desenvolvimento experimental adotado.

O delineamento da pesquisa é apresentado na Figura 5.1. O presente trabalho foi composto de quatro etapas: (a) revisão bibliográfica (Etapa 1); (b) desenvolvimento experimental (Etapa 2); determinação dos parâmetros de interesse (Etapa 3); modelagem numérica (Etapa 4); (d) análise dos resultados (Etapa 5); e (e) conclusões e recomendações (Etapa 6).

Figura 5.1: Delineamento da pesquisa



Fonte: O autor

Na primeira etapa foi realizada uma revisão bibliográfica dos conceitos envolvidos na pesquisa para o embasamento teórico do trabalho, entre eles: características da água de produção de petróleo, propriedades hidráulicas em solos saturados e não saturados e mecanismos de transporte de solutos no meio poroso.

A segunda etapa está relacionada ao desenvolvimento experimental, o qual foi dividido nas seguintes subetapas: coleta de amostras de solo em campo; caracterização das amostras; caracterização dos fluidos utilizados; descrição dos equipamentos utilizados; desenvolvimento de aparelho para realização dos ensaios de coluna; compactação dos corpos de prova; montagem e execução dos ensaios de coluna utilizando a água de produção; realização dos ensaios complementares.

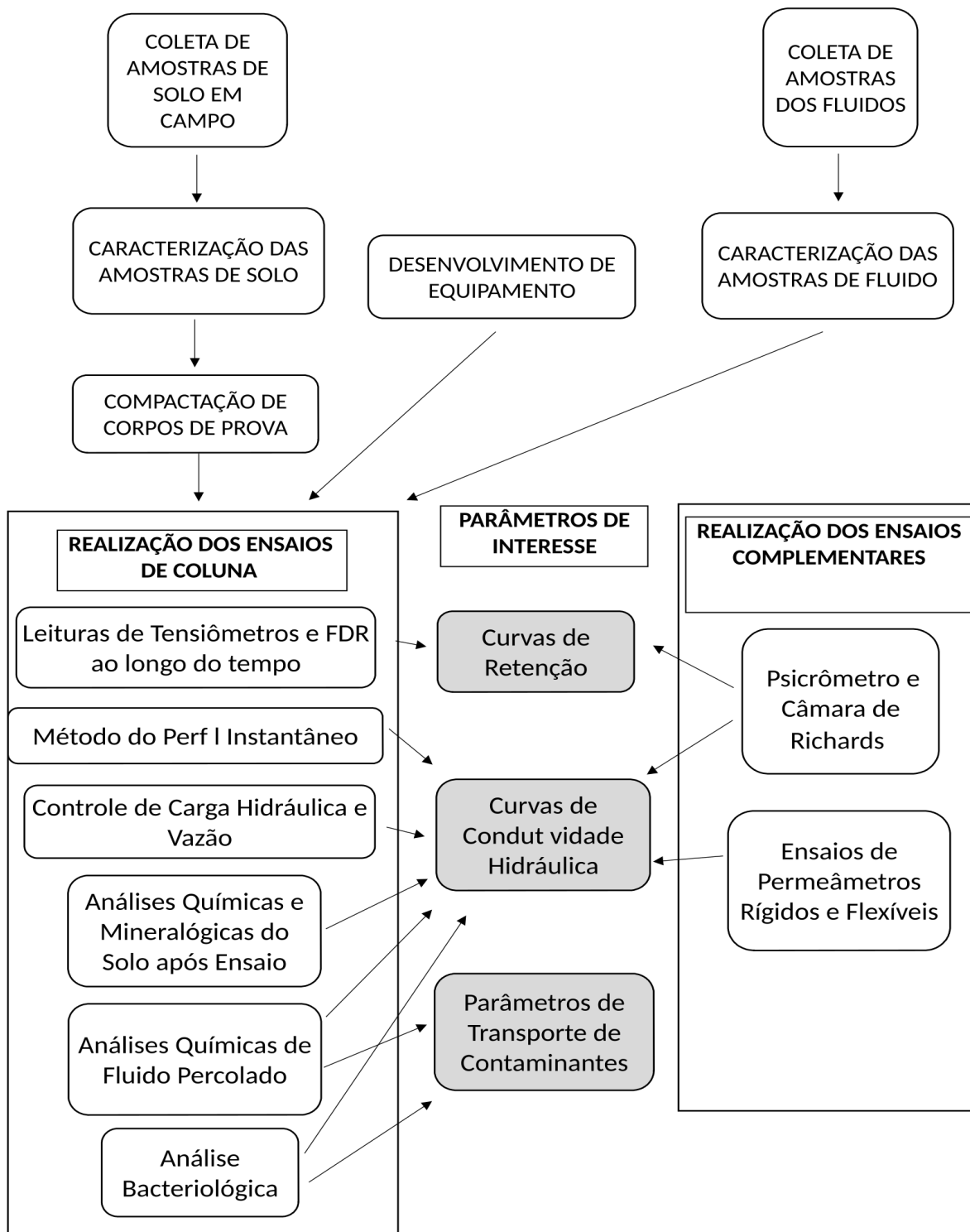
Na terceira etapa, são determinados os parâmetros de interesse nas diversas áreas de pesquisa permitindo o entendimento do fenômeno e modelagem do mesmo.

Na quarta etapa é realizada a modelagem numérica do fenômeno e são discutidos de maneira qualitativa e quantitativa os resultados obtidos.

Na quinta e última etapa serão apresentadas as conclusões alcançadas no estudo e recomendações previstas para projetos futuros.

A Figura 5.2 apresenta o fluxograma do desenvolvimento experimental proposto para o trabalho.

Figura 5.2: Etapas do Desenvolvimento Experimental



Fonte: O Autor

5.1. Desenvolvimento Experimental

5.1.1. Solos Utilizados

As amostras de solo utilizadas neste trabalho foram coletadas em áreas de exploração e armazenamento de petróleo *onshore*, denominadas de Área 2 (ver Figuras 5.3 e 5.4) pela equipe do GEOAMB (UFBA), em uma área de empréstimo vizinha a Área 4 (ver Figura 5.7 e 5.9), onde foram coletadas amostras de solo denominado localmente como Solo Piçarra.

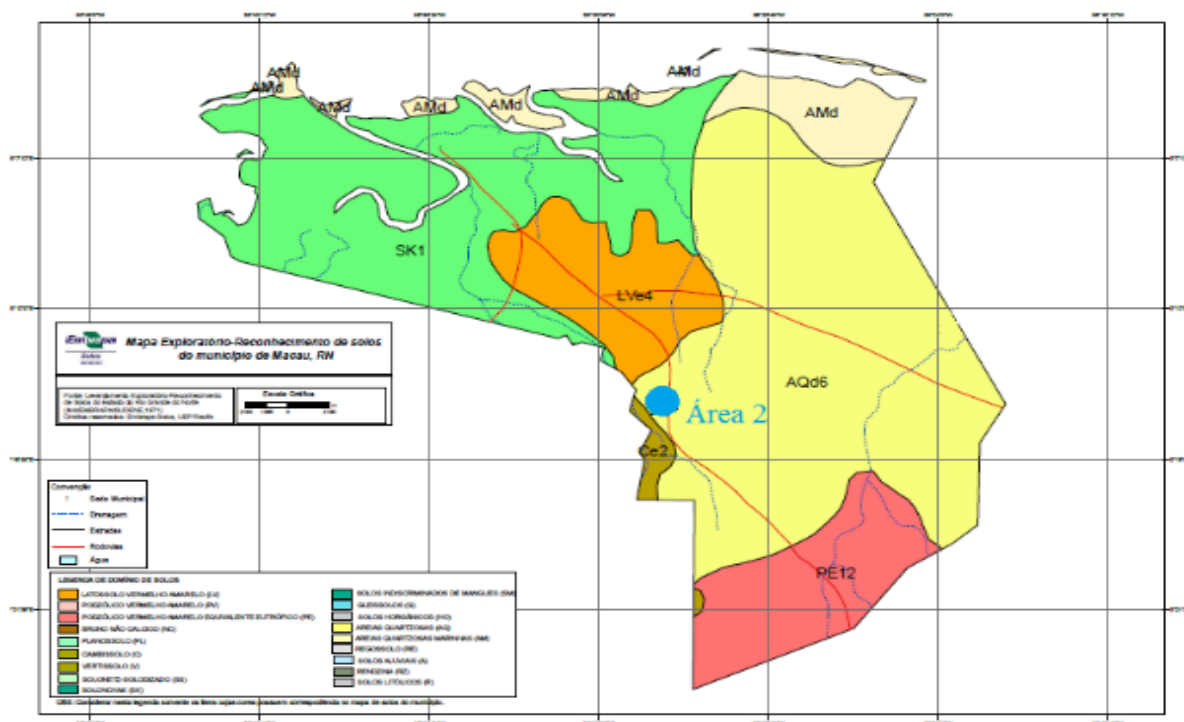
A área denominada de Área 2 está localizada nas imediações da faixa de dutos que transporta grande parte da produção de petróleo da PETROBRAS/VO-RNCE para a UTPF (Unidade de Tratamento e Processamento de Fluidos). Essa área, localizada no Município de Macau-RN, constitui-se de um local com pouca cobertura vegetal, onde a coleta de amostras indeformadas se apresentou bastante dificultada pela baixa espessura do solo residual. Diante desta situação e considerando a aparente característica argilosa daquele solo, surgiu a possibilidade de se aproveitar esta região como jazida de solo para construção de bacias de contenção.

Figura 5.3:- Foto ilustrativa da área 2



Fonte Google-earth

Figura 5.4 - Localização da Área 2



Fonte: Modificado de EMBRAPA SOLOS UEP RECIFE

Primeiramente, foram coletadas amostras do solo na área próxima ao duto (Ver Figura 5.5). Nesta área, escavando-se o solo cerca de 30 cm atingiu-se a rocha, tornando impossíveis avanços posteriores ou retirada de amostras indeformadas. Desta maneira, o solo foi retirado desta camada de 30 cm, como amostras deformadas. Para fins de registro interno, este solo foi denominado de Solo Vermelho.

Figura 5.5: Solo coletado ao redor do oleoduto



Fonte: GEOAMB (2016)

Após a coleta das amostras de Solo Vermelho, foram coletadas amostras deformadas nas margens de um rio intermitente que cruza o duto em local próximo, conforme ilustrado na sequência.

Para fins de controle interno, este solo foi denominado de solo de várzea. A identificação tátil e visual do solo de várzea indicava que o mesmo possuía um caráter ainda mais argiloso que o solo vermelho (alta resistência dos torrões secos, ocorrência de muitas trincas de retração, etc), o que pode ser verificado na Figura 5.6.

Figura 5.6 - Aspecto do solo argiloso encontrado na margem de rio que cruza o oleoduto



Fonte: GEOAMB (2016)

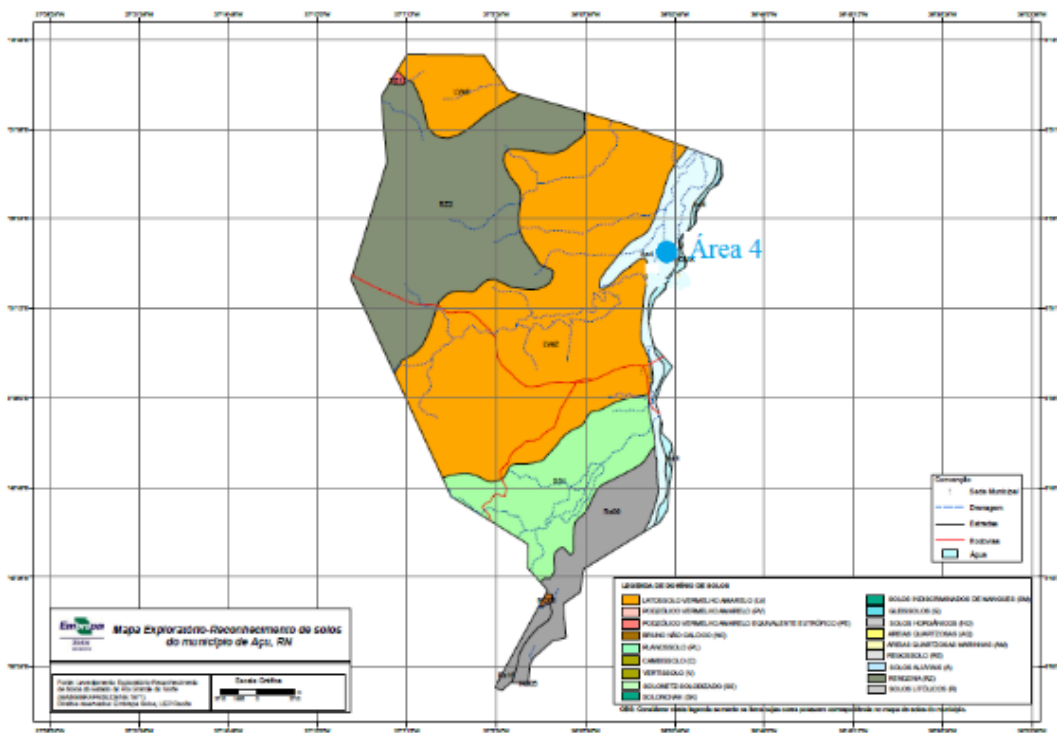
A área 4, localizada no campo de petróleo de Estreito (ET), no Rio Grande do Norte, apresenta a presença de distintas camadas de solo sedimentar. Neste local se encontra uma área de empréstimo que serve de jazida de Solo Piçarra, o qual é utilizado na construção das bases dos poços de produção. A Figura 5.9, mostra uma fotografia aérea da área de empréstimo localizada próxima a área 4

Figura 5.7 - Foto ilustrativa da área 4



Fonte: Google-earth

Figura 5.8 - Localização da Área 4



Fonte: Modificado de EMBRAPA Solos UEP RECIFE

Figura 5.9 -Foto ilustrativa de vista da área de empréstimo localizada próxima a área 4.



Fonte: GEOAMB (2016)

Posteriormente a visita de campo, efetuada pela equipe do GEOAMB (Laboratório de Geotecnia Ambiental da UFBA), foram coletadas nesta área, por prepostos da PETROBRAS, amostras deformadas de Solo Piçarra oriunda da área de empréstimo. A 5.10 apresenta o aspecto das amostras do solo piçarra coletado como amostras deformadas.

Figura 5.10 - Foto de Solo Piçarra Coletado



Fonte: GEOAMB (2016)

Para possibilitar o conhecimento das propriedades dos solos utilizados no estudo de migração de contaminantes e infiltração foram realizados os seguintes ensaios de laboratório: caracterização física do solo, de mineralogia e físico-química. Estes ensaios são apresentados mais em detalhes nos itens seguintes.

Caracterização Física Do Solo

Os ensaios de caracterização física do solo foram realizados com o objetivo de determinar a distribuição granulométrica, a massa específica das partículas sólidas, ρ_s , e os limites de consistência (limite de plasticidade, W_p e limite de liquidez, W_L), permitindo a caracterização dos solos conforme o SUCS (Sistema Unificado De Classificação Dos Solos) e a NBR 6502. Além disso foram realizados ensaios de compactação para determinar a umidade ótima de compactação (w_{ot}) e a massa específica seca máxima de compactação ($\rho_{dm\acute{a}x}$).

O ensaio para análise granulométrica foi executado conforme a NBR7181 (2016) sendo compreendido por duas etapas: peneiramento (areia e pedregulho) e sedimentação (silte e argila). As peneiras utilizadas no ensaio estão padronizadas pela NBR 5734 (1980).

Os ensaios de granulometria das amostras foram executados pelo Laboratório de Mecânica dos Solos da Universidade Católica do Salvador. O resumo dos resultados dos ensaios de granulometria se encontram na Tabela 5.1. As curvas granulométricas obtidas dos solos Vermelho, Várzea e Piçarra são apresentadas na Figura 5.11. Na compactação dos corpos de prova, utilizando o solo piçarra, foi utilizada apenas a fração de solo que passou pela peneira nº 4, visando a evitar caminhos preferenciais de fluxo, conforme será relatado na seção 5.1.4.1. Devido a isto, os resultados do solo piçarra serão apresentados tanto considerando o solo original quanto considerando somente a fração de solo utilizada nos corpos de prova.

Tabela 5.1 : Granulometria, Índices de Consistência, Massa Específica dos Sólidos e Classificação

Descrição do Solo	Ensaio de Granulometria (%)						Índices de Consistência				ρ_s (g/ cm ³)	Classificação	
	P	AG	AM	AF	S	A	W _L	W _P	IP	IA		SUCS	NBR 6502
Solo Vermelho	9	12	27	26	10	16	25	14	11	0,675	2,708	SC	Areia argilo-siltosa com pouco pedregulho
Solo Várzea	1	4	18	28	14	35	48	22	26	0,740	2,728	SC	Areia argilo-siltosa com vestígios de pedregulho
Solo Piçarra	47	16	10	9	9	19	34	22	12	0,632	2,786	SC	Pedregulho arenoargiloso com pouco silte
Solo Piçarra (Corpos de Prova)	22	9	11	18	12	28	34	22	12	0,43*	2,786	SC	Areia argilo-siltosa com pedregulho

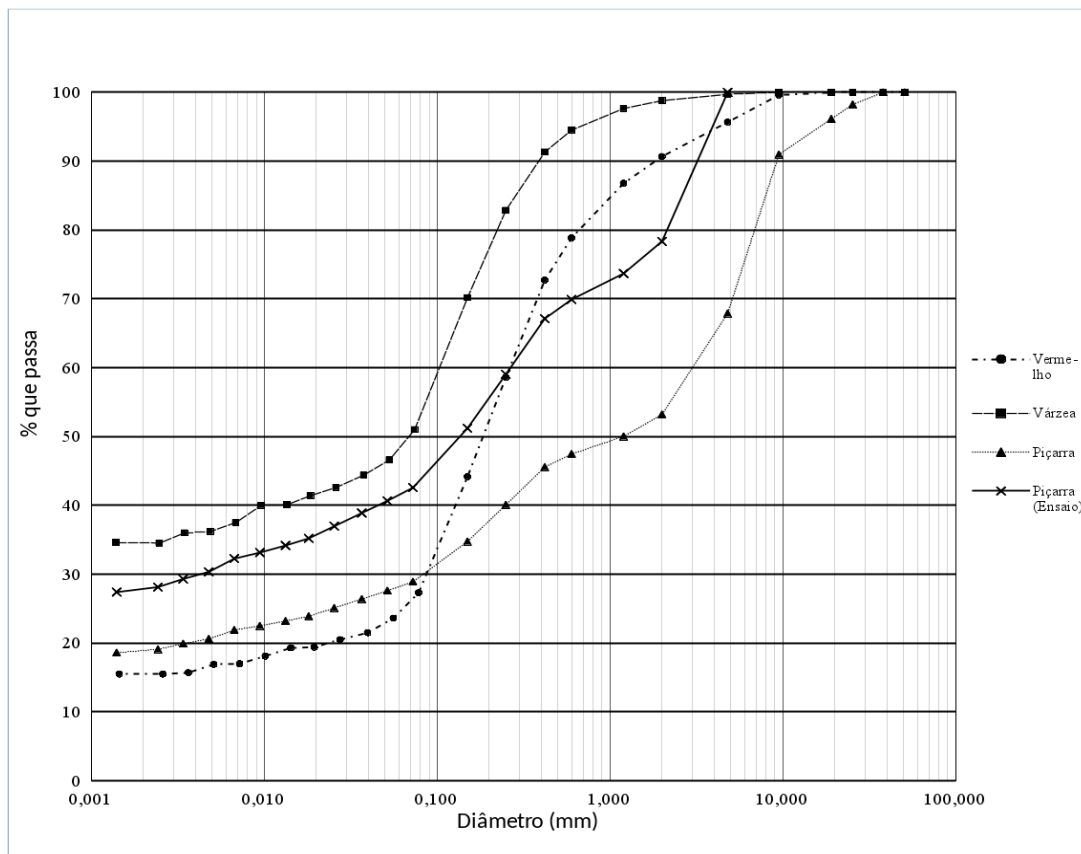
Fonte: O Autor

*O valor do índice de atividade, IA, varia já que a quantidade relativa de argila aumenta e o índice de plasticidade se mantém constante (ensaio referente a solos finos).

Legenda:

P – Pedregulho, AG – Areia Grossa, AM – Areia Média, AF – Areia Fina, S – Silte, A – Argila
SC – Areia Argilosa

Figura 5.11 – Curva Granulométrica dos Solo Vermelho, Várzea e Piçarra

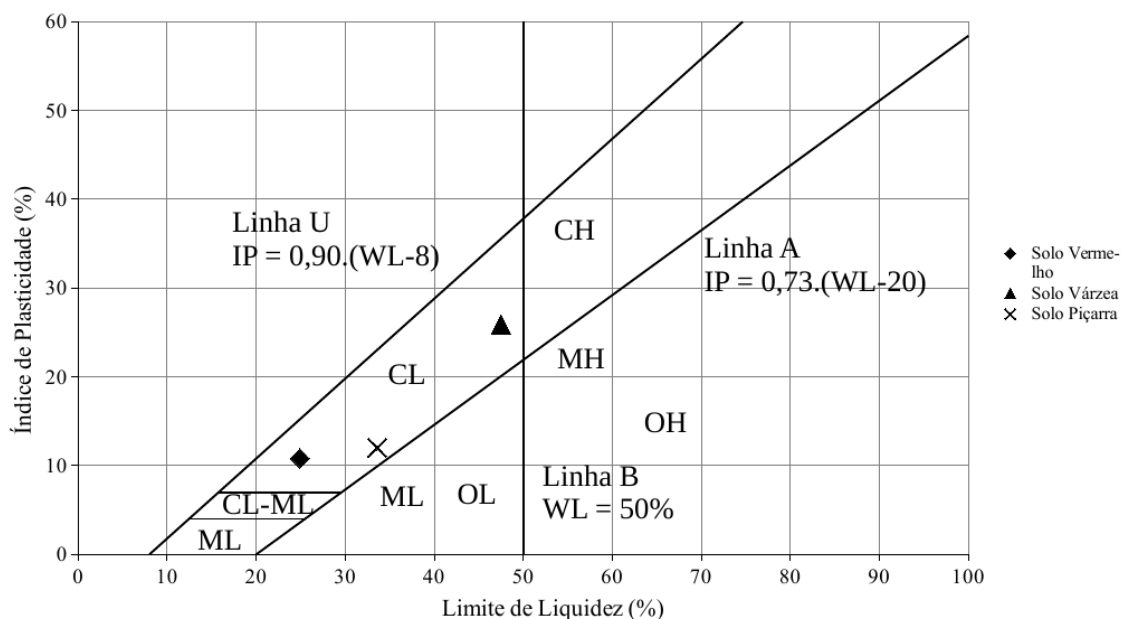


Fonte: O autor

Foram realizados ensaios para determinação da massa específica dos sólidos (ρ_s) de acordo com a NBR 6458 (2016). O método utilizado para esta determinação foi o método do picnômetro utilizando a água com fluido.

A determinação dos Limites de Consistência seguiu as normas NBR 6459 (1984) para determinação do Limite de Liquidez (W_L) e a norma NBR 7180(1984) para determinação do Limite de Plasticidade (W_P). A Carta de Plasticidade com a identificação dos solos está representada na Figura 5.12

Figura 5.12: Carta de Plasticidade dos Solos Vermelho, Várzea e Piçarra



Fonte: O autor

Conforme se pode observar da análise dos resultados de caracterização, os três solos estão enquadrados como solos grossos (preponderância de areias ou pedregulhos) com considerável fração de solos finos. Os solo vermelho e piçarra apresentaram índice de plasticidade, IP , de 11% e 12% respectivamente, podendo ser considerados de plasticidade média a alta, enquanto que o solo várzea foi o que apresentou maior caráter argiloso ($IP = 26\%$). Analisando a Carta de Plasticidade de Casagrande (Figura 5.12), nos três solos, a fração fina é caracterizada como CL (argilas de baixa plasticidade), apesar de que é notório que o Solo Várzea está muito mais próximo da linha B ($W_L = 50\%$) que o Solo Vermelho e o Solo Piçarra.. Também é possível verificar visualmente que o Solo Piçarra é aquele que possui mais influência de compostos orgânicos, por isso se encontrando bem próximo à linha A. Tal observação é condizente com os valores do ensaio STV (sólidos totais voláteis) apresentados em seção a seguir.

O ensaio de compactação foi realizado com o objetivo de determinar a umidade ótima de compactação (w_{ot}) e a massa específica seca máxima ($\rho_{dmáx}$) dos três tipos de solos estudados para a posterior utilização durante a confecção dos corpos de prova dos ensaios de coluna.

Para a realização do ensaio utilizou-se as normas NBR7182 e NBR6475. Para o Solo Vermelho foi considerada energia de compactação do Proctor Modificado; para o Solo Várzea foi considerada a energia de compactação Proctor Normal e para o Solo Piçarra foram realizados ensaios de compactação nas energias Proctor Normal, Intermediário e Modificado. No caso do Solo Piçarra, os resultados dos ensaios de compactação foram utilizados em conjunto com os resultados obtidos dos ensaios de permeabilidade realizados previamente em laboratório e serviram de base para a estimação das energias de compactação que resultariam em condutividades hidráulicas de $k=1 \times 10^{-4}$, $k=1 \times 10^{-5}$ e $k=1 \times 10^{-6}$ cm/s, solicitadas pela Petrobras. Este intervalo de variação dos valores de k, corresponde à faixa de valores adotados pela NBR 17505-2 (2015) como especificação para a confecção de camadas de proteção mineral, conforme relatado na revisão bibliográfica do trabalho. Os resultados dos ensaios de compactação estão apresentados na Tabela 5.2.

Tabela 5.2: Resultados de Ensaio de Compactação

Descrição do Solo	Energia de Compactação	w_{ot} (%)	ρ_{dmax} (g/cm ³)
Solo Vermelho	Proctor Modificado	8,92	2,003
Solo Várzea	Proctor Normal	15,58	1,664
	Proctor Normal	15,36	1,780
Solo Piçarra	Proctor Intermediário	14,95	1,784
	Proctor Modificado	12,99	1,867
	E = 5 kgf·cm/cm ³	15,80	1,764
	E = 7 kgf·cm/cm ³	15,40	1,783
	E = 9 kgf·cm/cm ³	15,19	1,839

Fonte: O Autor

Em posse dos resultados de permeabilidade, foram definidas as energias de compactação a serem utilizadas no estudo e foram realizados novos ensaios de compactação com o Solo Piçarra utilizando as energias 5, 7 e 9 kgf.cm/cm³, as quais supostamente forneceriam os valores de permeabilidade desejados. Como os resultados dos ensaios de compactação e permeabilidade se demonstraram muito próximos utilizando as energias supracitadas, foi estabelecido que as energias de compactação empregadas nos corpos de prova dos ensaios de coluna com Solo Piçarra seriam a do Proctor Normal (E = 5,95

kgf.cm/cm³), $E = 9$ kgf.cm/cm³ e a energia do Proctor Intermediário ($E = 12,9$ kgf.cm/cm³). Os parâmetros considerados para definição destas energias serão explicitados na seção 6.1.

Caracterização Mineralógica Dos Solos

A análise mineralógica é fundamental para o entendimento das propriedades geotécnicas, principalmente na área de migração de contaminantes, já que a interação do solo com o fluido dependerá do tamanho, da forma, da origem e da superfície específica das partículas sólidas. Para caracterizar mineralogicamente os solos foram realizados os ensaios de Difractometria de Raios-X (DRX) e de Fluorescência de Raios-X (FRX) .

A Fluorescência de Raio-X (FRX) é uma técnica de crescente uso na geotecnia ambiental. O princípio de funcionamento desta técnica está relacionado com a medida de energia e intensidade características da radiação X emitida por uma amostra irradiada com radiação eletromagnética de alta carga (TERRA et al., 2014). Neste trabalho, as amostras foram caracterizadas utilizando um espectrômetro portátil de fluorescência de raios-X (X-MET 7500, Oxford Instruments, UK) e está apresentado na Figura 5.13. Estes ensaios foram realizados previamente aos ensaios de DRX, para facilitar a identificação dos minerais.

Figura 5.13: Espectrômetro Portátil de FRX modelo X-MET 7500



Fonte: O autor

O método deste ensaios consistiu em colocar as amostras de solos secos em estufa com massa aproximada de 100 g em sacos plásticos de pequena espessura de parede. Apoiando esta em uma bancada, aciona-se o espectrômetro, deixando em contato com o saco durante aproximadamente 15 segundos. Para cada tipo de solo o procedimento foi repetido dez vezes e os valores médios das concentrações dos principais elementos estão apresentados na Tabela 5.3 . Conforme esperado a partir da curva granulométrica há uma considerável quantidade de alumínio, presente principalmente nos solos finos. O Solo Piçarra, aquele que possui maior quantidade relativa de finos (58%), considerando a fração que passa na peneira #4, apresenta 15,85% de alumínio; seguido do Solo Várzea, com quantidade de finos igual a 52% e 8,91% de Alumínio; e, por último com a menor quantidade de finos (33%), o Solo Vermelho apresenta 7,39% de alumínio no ensaio FRX.

Tabela 5.3: FRX - Concentração dos Principais Elementos

Descrição do Solo	Concentração dos Elementos (%)							
	Al	Si	Cl	K	Ca	Ti	Fe	Co
Solo Vermelho	7,39	33,17	1,57	1,13	0,45	0,35	0,45	0,23
Solo Várzea	8,91	26,97	1,82	3,27	5,26	0,50	0,70	0,37
Solo Piçarra	15,85	25,50	1,19	0,00	0,14	1,22	1,21	0,33

Fonte: O autor

A difratometria de raios-X (DRX) é uma técnica que se baseia na interação de uma radiação monocromática de raios-X com a amostra em diversos ângulos de incidência, identificando, caracterizando e quantificando as fases minerais que compõem o solo. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Ensaio em Durabilidade dos Materiais – (LEDMA) da Universidade Federal da Bahia mediante a disponibilização de amostras de cada solo passando na peneira #200.. Os dados obtidos nos ensaios DRX estão apresentados na Tabela para cada solo:

Tabela 5.4: DRX - Concentração dos Principais Compostos

Composto (%)	Solo		
	Solo Vermelho	Solo Várzea	Solo Piçarra
Quartzo	47,42	20,36	7,25
Clorita	20,42	0	0
Caulinita	0	14,21	28,14
Dickita	0	0	22,70
Nacrita	0	0	12,41
Microlina	10,95	13,20	0
Titanita	0	6,37	0
Calcita	0	9,39	0
Macfalita	0	1,26	0
Amorfo	21,20	35,20	29,50

Fonte: O autor

Observando os resultados de caracterização do ensaio DRX é possível notar que os solos Piçarra e Várzea possuem argilo-minerais do grupo da Caulinita (Caulinita, Dickita e Nacrita), ou seja 1:1, enquanto o solo vermelho possui argilominerais do tipo 2:1 (Clorita), conseqüentemente como maior área específica e maior atividade que os argilominerais 1:1. Este resultado, contudo, não se refletiu em um maior índice de atividade para as amostras de Solo Vermelho.

Caracterização Físico-química Dos Solos

A determinação do teor de matéria orgânica das amostras empregadas ocorreu através do método dos Sólidos Totais Voláteis (STV), também conhecido como método da mufla.

O material que pode ser volatilizado e queimado quando calcinado a $500 \pm 50^{\circ}\text{C}$ é classificado como volátil. Em geral, presume-se que sólidos voláteis são matéria orgânica, apesar de alguns materiais orgânicos não queimarem e alguns sólidos inorgânicos serem consumidos em altas temperaturas. Sólidos Totais Fixos (STF) incluem o resíduo que permanece depois da amostra ter sido calcinado. A razão entre sólidos voláteis e sólidos fixos é frequentemente utilizada para caracterizar o solo no que diz respeito à quantidade de matéria orgânica presente (TCHOBANOGLOUS, 2003).

Para cada tipo de solo foram retiradas três amostras com massa aproximada de 70 g. Estas amostras foram colocadas em cadinhos e levadas à estufa a 70°C por dois dias. Após este período, os cadinhos foram calcinados em mufla a 600°C por duas horas. A quantidade dos Sólidos Totais Voláteis é dada pela diferença de massa entre a amostra após secagem em mufla e a massa após secagem em estufa. Os resultados do ensaio STV são apresentados na tabela 5.5. Conforme é possível observar, os solos vermelho e várzea não possuem elevado teor de matéria orgânica enquanto o solo piçarra apresenta aproximadamente 10%, referenciado na granulometria utilizada nos corpos de prova (material que passa na #19mm). Esta diferença é notada na Carta de Plasticidade (Figura 5.12) apresentada na seção anterior.

Tabela 5.5: Quantidade de Sólidos Totais Voláteis

Descrição do Solo	Quantidade de Matéria Orgânica (%)
Solo Vermelho	2,00
Solo Várzea	3,93
Solo Piçarra	9,31

Fonte: O autor

5.1.2. Fluidos Utilizados

Foram realizados ensaios de caracterização física e química dos fluidos utilizados na pesquisa. Por conta da insuficiência do volume de fluido coletado, parte dos fluidos utilizados foi produzido no laboratório, a partir da mistura das seguintes quantidades: 500 ml de óleo cru original do local, 19,5 l de água deionizada e adição de 0,5 g/L de cloreto de sódio (NaCl), valor estimado a partir dos ensaios de caracterização química do fluido original. A mistura mecânica foi realizada no próprio galão de armazenamento com capacidade de 25L através da agitação do mesmo por 1 minuto. Antes de a utilização dos fluidos, a mistura foi deixada em repouso durante uma semana e foi retirada uma alíquota para caracterização. Apesar de serem tomados os devidos cuidados na dosagem, os fluidos produzidos no laboratório, em função da variabilidade das propriedades do óleo cru, apresentaram concentração de sódio e salinidade maiores que os fluidos originais. Os valores de concentração de HTP variaram de 0,5 a 6 vezes o valor encontrado para os fluidos originais. Esta grande dispersão nos valores de HTP ocorreu devido à presença de gotículas de óleo em quantidade variável de amostra para amostra.

Caracterização Física Dos Fluidos

Os ensaios de caracterização física dos fluidos foram realizados com o objetivo de determinar a viscosidade e a massa específica, propriedades essenciais para o entendimento da migração de contaminantes não miscíveis em meios porosos.

Viscosidade

A viscosidade dos fluidos utilizados nos ensaios foram obtidas utilizando um viscosímetro rotacional (Viscosímetro Digital DV2T, Braseq Tecnologia, Brasil) apresentado na Figura 5.14.. Neste equipamento a viscosidade do fluido colocado no interior do equipamento é medida pela força de atrito viscoso provocada pela velocidade angular de uma parte móvel em relação à parte fixa. A parte móvel do equipamento é formada por paletas com dimensões variáveis a depender da faixa de viscosidade esperada do fluido ensaiado.

Figura 5.14: Viscosímetro Digital DV2T



Fonte: Braseq (2017)

O ensaio se inicia com a escolha da paleta já que para cada faixa de viscosidade do fluido ensaiado é indicado um tipo de paleta. O tamanho das paletas indicadas diminui com o

aumento da viscosidade esperada para o fluido. No caso da água de produção, foi utilizada a paleta indicada para água pois se imaginou que a viscosidade medida não divergiria muito por se tratar de água com concentrações relativamente baixas de solutos. Após o encaixe da paleta, realiza-se a calibração automática através do próprio viscosímetro.

Depois da calibração do equipamento, conecta-se o tubo acoplado ao banho térmico para controle da temperatura. Este conjunto é fixado na torre do viscosímetro. As peças supracitadas estão apresentadas nas Figuras 5.27 e 5.26. Conectado o banho térmico (Figura 5.17) e atingida a temperatura desejada, inicia-se a medida de viscosidade. Após a leitura da viscosidade, modifica-se a temperatura desejada no banho térmico e se espera a sua estabilização, repetindo-se o procedimento quantas vezes for desejado, no caso para as temperaturas de 20°, 30° e 40°.

Figura 5.15: Dispositivo de Variação de Temperatura



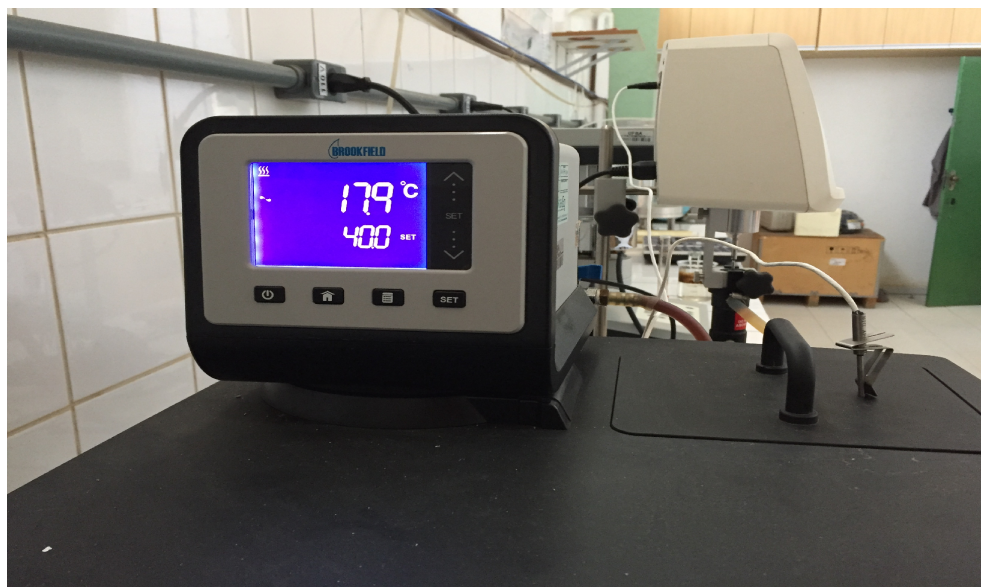
Fonte: O autor

Figura 5.16: Foto Cilindro Metálico e Paleta



Fonte: O autor

Figura5.17: Foto ilustrativa do banho térmico utilizado



Fonte: O autor

A tabela 5.6 apresenta os valores de viscosidade obtidos para os fluidos empregados.

Tabela 5.6: Viscosidade dos Fluidos

Descrição do Fluido	Viscosidade a 20°C (cP)	Viscosidade a 30°C (cP)	Viscosidade a 40°C (cP)
Água de Produção PETROBRAS/UO- RNCE	1,36	1,27	1,22
Água de Produção Sintética	1,38	1,28	1,20

Fonte: O autor

Massa Específica

A massa específica dos fluidos utilizados nos experimentos foi determinada utilizando uma proveta graduada e uma balança de precisão. A proveta graduada foi preenchida com o fluido em questão até uma determinada medida e o peso do conjunto foi medido através da balança de precisão. Conhecendo a tara da proveta, foi determinada a massa específica do fluido a temperatura ambiente, 28°C.

Tabela 5.7: Massa Específica dos Fluidos

Descrição do Fluido	Massa Específica a 28°C (g/cm ³)
Água de Produção PETROBRAS/UO-RNCE	0,985
Água de Produção Sintética	0,991

Fonte: O autor

Caracterização Físico-química Dos Fluidos

Inicialmente, buscou-se analisar a presença das substâncias listadas pela CONAMA 420 (2009), verificando se a concentração de tais substâncias superariam os limites determinados pela norma. As substâncias listadas por essa resolução são divididas entre inorgânicas (vinte tipos de metais) e orgânicas (vinte e um tipos de hidrocarbonetos). Como os valores de concentração encontrados para os metais foram muito menores que os limites estabelecidos pela CONAMA 420 (2009), optou-se por não analisar estes parâmetros. Quanto aos componentes orgânicos, pela dificuldade de identificar os tipos de hidrocarbonetos devido à instabilidade molecular e volatilidade de alguns, optou-se por analisar a concentrações de HTP (hidrocarbonetos totais de petróleo) sem detalhar os tipos de hidrocarbonetos presentes nas amostras. Ressalta-se também, que por se tratar de óleo cru, não processado, a presença dos compostos orgânicos listados na CONAMA 420 não pôde ser detectada. Foram realizados, no Laboratório de Estudos do Petróleo (Lepetro) ensaios de caracterização físico-química dos fluidos empregados, determinando-se os seguintes parâmetros: concentração de HTP, Concentração de Cátions (Ca, Mg, Na e K), Salinidade, Condutividade Elétrica (CE) e potencial de hidrogênio ou hidrogênico (pH).

Concentração de HTP

A quantificação de hidrocarbonetos totais de petróleo (HTP) na água de produção foi realizada pela equipe do Lepetro através do método EPA 8015B, quantificando os n-alcenos individuais (n-C12 ao n-C40), os isoprenóides (fitano e pristano), os compostos resolvidos e a mistura complexa não resolvida (UCM). As concentrações foram determinadas através da injeção de extratos em um cromatógrafo a gás com detector de ionização por chama (CG/DIC) Para geração dos extratos, foram utilizadas amostras com volume mínimo de 400 cm³ visando a obter resultados acima do limite de detecção do método.

Condutividade Elétrica

A condutividade elétrica dos fluidos foi determinada de acordo com Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 22nd Edition, 2012. Método 2510 A/B.

Potencial de Hidrogênio (pH)

O potencial de hidrogênio dos fluidos foi determinado de acordo com a norma 4500-H+B. A tabela 5.8 apresenta os resultados de caracterização dos fluidos.

Tabela 5.8: Concentração de HTP, CE e pH

Identificação do Fluido	Ensaio onde foi utilizado	Concentração Média de HTP (µg/L)	CE (uS/cm)	pH
Galão 1 (Área 2)	Vermelho CP1 e CP2	1.088,00	2.400,00	7,35
Galão 2, 4, 12 (Área 2)	Várzea CP1, CP2, CP4	2.860,00	2.540,00	7,02
Fluido Sintético	Piçarra CP1 (P. Normal)	11.001,00	12.300,00	8,59
Fluido Sintético	Piçarra CP4 (P. Interm)	4.092,00	3.040,00	7,75
Fluido Sintético	Piçarra CP5 (P. Interm)	11.001,00	12.300,00	8,59
Fluido Sintético	Piçarra CP6 (P. Interm)	1.656,00	2.100,00	7,48
Fluido Sintético	Piçarra CP8 e CP9	1.547,00	2.890,00	5,54

Fonte: O autor

Concentração Iônica

Através dos métodos da cromatografia iônica e SM-3120B foram determinadas pela equipe do Lepetro as concentrações dos seguintes cátions e a salinidade das amostras de fluido, visando a obter valores de referência para verificar a ocorrência de trocas entre o fluido e o solo durante o ensaio: Potássio (K), Magnésio (Mg), Cálcio (Ca) e Sódio (Na). A seguir na Tabela 5.9, são apresentados os resultados obtidos:

Tabela 5.9: Concentração de Cátions e Salinidade

Identificação do Fluido	Ensaio onde foi utilizado	K (mg/L)	Mg (mg/L)	Ca (mg/L)	Na (mg/L)	Salinidade (mg/L)
Galão 1 (Área 2)	Vermelho CP1 e CP2	8,79	51,0	2,4	278,98	1390
Galão 2, 4, 12, N30 (Área 2)	Várzea (CP1, CP2, CP4)	14,8	44,5	14,8	276,96	1320
Fluido Sintético	Piçarra CP1 (P. Normal)	11,5	10,7	9,2	940,74	5680
Fluido Sintético	Piçarra CP4 (P. Interm)	19,1	5,2	56,0	440,00	1550
Fluido Sintético	Piçarra CP5 (P. Interm)	11,5	10,7	9,2	940,74	5680
Fluido Sintético	Piçarra CP6 (P. Interm)	0,3	1,0	13,6	416,98	1260
Fluido Sintético	Piçarra CP8 e CP9 (E = 9kg.cm/cm ³)	122,5	0,9	4,5	497,60	1040

Fonte: O autor

Analisando a caracterização física e físico-química dos fluidos é possível perceber que:

(1) Os valores de viscosidade e densidade da água de produção original e da água de produção desenvolvida em laboratório se aproximam dos valores da água destilada.

(2) Os ensaios realizados com o Solo Vermelho e com o Solo Várzea utilizaram fluidos originais de galões diferentes. Com exceção da concentração de HTP, os demais valores são bastante próximos entre si.

(3) Os ensaios realizados com o Solo Piçarra utilizaram fluidos desenvolvidos no laboratório. Esses fluidos apresentaram maiores concentrações de sódio e menor concentração de Magnésio (Mg) que os fluidos originais. O fluido utilizado no Piçarra CP4 apresentou concentração de cálcio muito superior aos demais. Nos ensaios realizados com o Piçarra CP1 e Piçarra CP5, foi utilizado um fluido com valores bem mais altos de concentração de Sódio (Na) além de HTP, condutividade elétrica e salinidade, conforme apresentado na Tabela 5.9. Quanto ao fluido utilizado nos solos Piçarra CP8 e 9 apresentou concentração de potássio (K) muito superior aos demais.

5.1.3. *Ensaio De Coluna Monitorada*

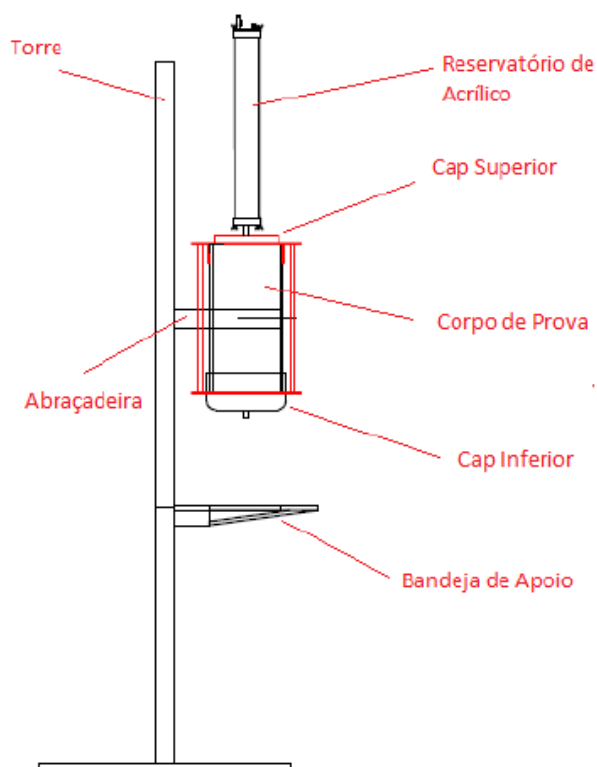
5.1.3.1. Desenvolvimento do Equipamento

O equipamento para a realização dos ensaios de coluna monitorado foi desenvolvido pelo autor deste trabalho em conjunto com a equipe do GEOAMB (Laboratório de Geotecnia Ambiental da UFBA). É uma adaptação do equipamento utilizado no ensaio de coluna convencional utilizado por diversos autores (BASSO, 2003; SOUZA, 2009; MARQUES, 2011 E ALMEIDA, 2015, dentre outros). Essa coluna requereu a implantação de sondas de TDR (*Time Domain Reflectometry*) ou FDR (*Frequency Domain Reflectometry*), além de tensiômetros ao longo do corpo de prova. Algumas outras modificações que foram necessárias estão descritas a seguir. O sistema é composto pelos seguintes componentes: torre, reservatório, colunas de percolação e sondas.

Torre

A torre do equipamento tem a função de sustentar o permeâmetro mantendo a verticalidade de ensaio. Ela é composta de uma base quadrada de aço com lado igual a 70 cm e uma haste tubular de aço soldada no centro da base com diâmetro de 50 mm. Na haste são fixadas as abraçadeiras que sustentam os corpos de prova e a bandeja de apoio de amostras através de parafusos.

Figura 5.18: Esquema gráfico do Equipamento do Ensaio de Coluna



Fonte: O autor

Reservatório

Inicialmente o equipamento foi projetado com um reservatório do tipo Mariotte acoplado ao corpo de prova do ensaio de coluna. Este reservatório Mariotte teria a função de abastecer o ensaio e, simultaneamente, controlar a carga hidráulica constante no topo do corpo de prova. O reservatório era composto por um tubo de PVC com diâmetro nominal de 20 cm e altura de 60 cm com uma mangueira graduada implantada nas laterais que permitia a medição do volume liberado, sendo vedado com dois cabeçotes fixados através de um sistema de travamento metálico. O cabeçote superior contava com um registro que permitia o acesso para abastecimento do reservatório de Mariotte além da vedação do sistema, fazendo com que a única ligação com o meio externo fosse o tubo de regulação da pressão. O cabeçote inferior possuía uma saída central na qual era conectada uma mangueira. Na outra ponta, a mangueira encaixava em um cilindro metálico com ponta biselada cravado no corpo de prova. Nas

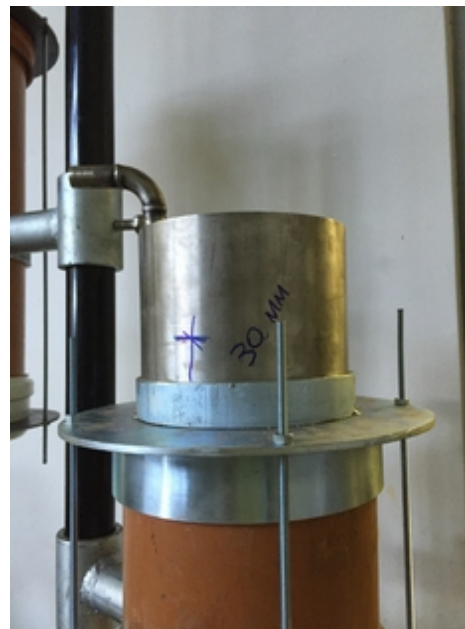
figuras 5.19 e 5.20 constam fotografias do Reservatório de Mariotte e do cilindro metálico, respectivamente.

Figura 5.19: Foto Reservatório de Mariotte



Fonte: O autor

Figura 5.20: Foto Cilindro Metálico



Fonte: O autor

Ao se iniciar os primeiros ensaios com as amostras compactadas, verificou-se que a carga hidráulica proporcionada pelo sistema não seria suficiente para que o ensaio fosse realizado em tempo hábil. Além disto, como a vazão era bastante reduzida, o monitoramento do volume percolado através da mangueira lateral gerava uma imprecisão que influenciaria nos resultados obtidos, devido a efeitos como o da evaporação.

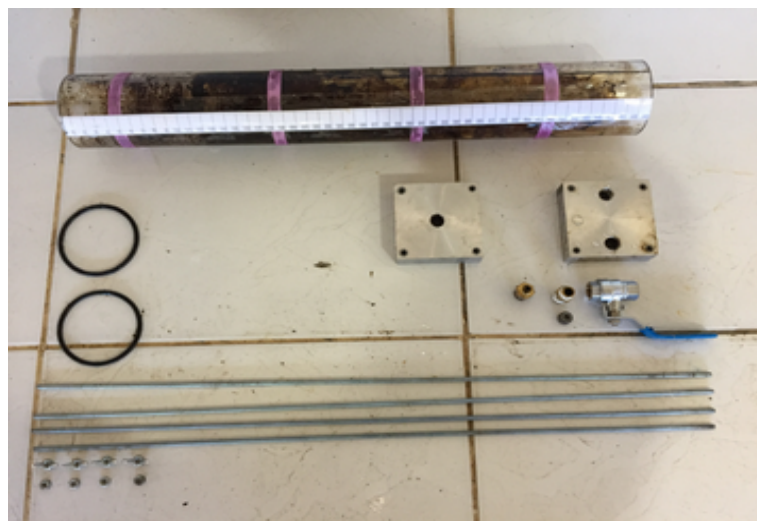
No intuito de solucionar os problemas encontrados nos primeiros ensaios foram estabelecidos os seguintes requisitos para o novo projeto de reservatório:

- 1- Permitir a aplicação de pressão externa através de uma linha de pressão, aumentando assim a carga hidráulica no topo do corpo de prova.
- 2- Ser transparente e possuir graduação para monitoramento do fluido que percola no corpo de prova.
- 3- Estar conectado isoladamente ao corpo de prova de forma a não haver vazamentos ou perda de carga durante o ensaio.

A partir destes requisitos foi desenvolvido o novo modelo de reservatório, mostrado na Figura 5.21, conforme a descrição a seguir.

O novo reservatório é composto por um tubo transparente de acrílico com diâmetro nominal de 63 mm, comprimento de 500 mm e espessura de 4 mm, permitindo o armazenamento de cerca de 1558 cm³ de fluido percolante. Utilizando o reservatório transparente e mediante a adição de uma escala milimétrica foi possível monitorar a variação de volume do reservatório durante a percolação de maneira adequada: cada milímetro da escala equivale a apenas 3,116 cm³ de fluido. Para minorar os riscos de danos mecânicos ao reservatório e evitar o desgaste do tubo de acrílico devido à pressão durante o ensaio foram adotados reforços de fitas de ciamida a cada 10 cm solidarizadas e reforçadas por adesivo bicomponente à base de resina epóxi.

Figura 5.21: Novo modelo de reservatório (desmontado)



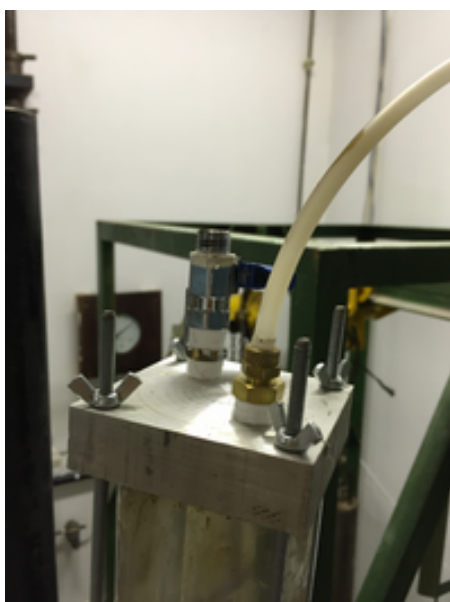
Fonte: O Autor

Nas extremidades do reservatório foram utilizados cabeçotes de alumínio quadrados com dimensão (8 cm x 8 cm x 2 cm). Nestes cabeçotes foi aberta uma cava circular com diâmetro ligeiramente superior ao do cilindro de acrílico e profundidade de 1 cm. Para permitir a vedação e fixação do sistema foram adotados *o-rings* de topo e base, posicionados entre as extremidades do cilindro e as cavas dos cabeçotes. Para a fixação completa do sistema foram utilizados quatro tirantes rosqueados fixados com o uso porcas.

No intuito de permitir o isolamento do reservatório para abastecimento, necessário em caso de se utilizar ar comprimido como fonte de carga hidráulica, foram instalados dois dispositivos no cabeçote superior: um terminal para conexão da linha de ar comprimido e um registro tipo esfera. O detalhe do cabeçote superior está representado na 5.22.

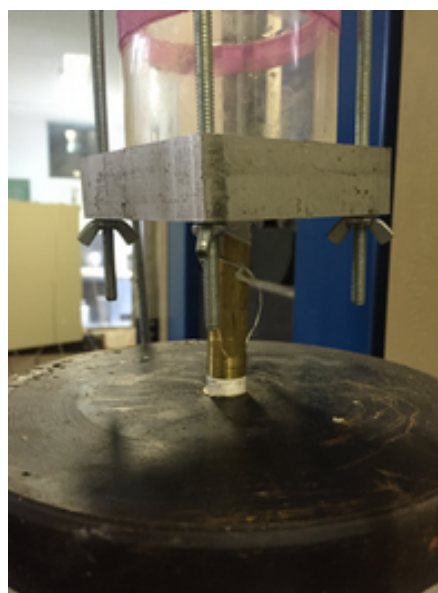
O cabeçote inferior é conectado ao topo das amostras utilizando um niple e permitindo a alimentação dos corpos de prova durante os ensaios. O cabeçote superior dos corpos de prova foi adaptado de forma a receber a conexão do tipo niple do cabeçote inferior do reservatório de acrílico, como é possível verificar na Figura 5.23.

Figura 5.22: Cabeçote superior do reservatório com dispositivos de isolamento



Fonte: O autor

Figura 5.23: Detalhe cabeçote inferior do reservatório, niple e adaptação do cabeçote superior da coluna



Fonte: O autor

Antes da execução dos ensaios, de forma a evitar que o acrílico pudesse absorver parte dos constituintes orgânicos dissolvidos na água de produção, as paredes internas foram impregnadas com óleo crú.

Colunas De Percolação

As colunas de percolação são permeômetros rígidos compostos pela célula de percolação, cabeçotes (superior e inferior), abraçadeira, tirantes de fixação, filtros geotêxteis e dreno lateral (no caso dos dois primeiros corpos de prova ensaiados).

A célula de percolação é constituída de um cilindro de PVC ranhurado internamente e com as seguintes dimensões: 40 cm de comprimento, diâmetro interno de 19,2 cm e espessura de parede de 1 mm. Este cilindro de PVC serve de molde para o solo durante a compactação. A função das ranhuras na parede interna é evitar caminhos preferenciais através da interface solo-parede (Figura 5.25).

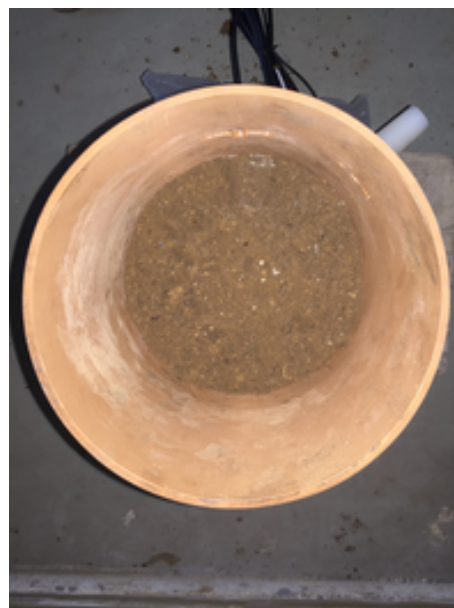
Para somente os dois primeiros corpos de prova compactados na energia Proctor Modificado (Vermelho CP1 e CP2), além do dreno situado no centro do cabeçote inferior, foi adotado um dreno intermediário, localizado na altura central do corpo de prova, que permitiria a coleta do fluido percolado (Figura 5.24). Este dreno é composto de uma mangueira de PVC de comprimento igual a 5 cm perfurada em alguns pontos, os quais servem como condutos para a passagem do fluido, envolvida por uma camada de geotêxtil não tecido costurada que impede a passagem das partículas do solo.

Figura 5.24: Detalhe do dreno lateral



Fonte: O autor

Figura 5.25: Foto do interior Tubo PVC



Fonte: O autor

Os cabeçotes permitem a vedação da coluna de percolação, além da drenagem do percolado (cabeçote inferior) e do abastecimento e distribuição homogênea da carga hidráulica em toda a seção do corpo de prova (cabeçote superior).

Figura 5.26: Foto da vista interna do cabeçote superior e *o-rings* Figura 5.27: Foto da vista interna do cabeçote inferior com geotêxtil



Fonte: O autor



Fonte: O autor

Nos dois primeiros ensaios foi utilizado, na extremidade inferior, um cabeçote de PVC com *o-ring* situado na parede do mesmo. Este cabeçote era fixado na coluna de percolação mediante a utilização de um anel de vedação e se conectava aos tirantes rosqueados, conforme apresenta a Figura 5.28.

Figura 5.28: Cabeçote inferior e travamento (esquema inicial)



Fonte: O autor

No intuito de se melhorar a vedação e permitir a aplicação de maiores pressões no reservatório, foi adotado, a partir do terceiro ensaio, um cabeçote metálico com dois *o-rings* internos com orifícios para o acoplamento dos tirantes, conforme a Figura 5.29.

Figura 5.29: Cabeçote inferior e travamento (esquema final)

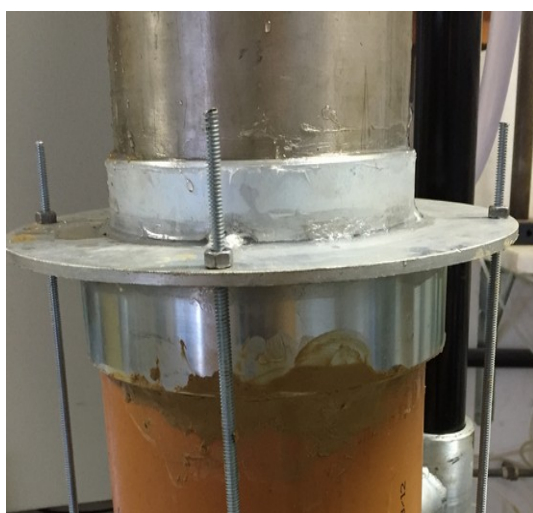


Fonte: O autor

Os cabeçotes inferiores possuem um dreno situado no centro da seção que possibilita a coleta do volume de fluido percolado através do corpo de prova.

O cabeçote superior também possui dois *o-rings* que asseguram a vedação e permitem a aplicação de maiores pressões no reservatório. O cabeçote superior, diferente do inferior, possui uma saliência a partir do plano em que se encontram os furos de fixação dos tirantes. Esta saliência funciona com um reservatório intermediário (*head space*) responsável por homogeneizar a pressão do fluido em toda a seção do corpo de prova. Este cabeçote também foi produto da modificação descrita anteriormente para permitir a conexão do novo reservatório de entrada de fluido com o corpo de prova, garantindo a vedação e manutenção da carga. Como parte das modificações efetuadas no cabeçote superior, a peça que atuava como reservatório de infiltração, aplicando no topo das amostras a água proveniente do reservatório mariotte (Figura 5.30), foi substituída por uma tampa metálica soldada no topo do cabeçote (Figura 5.31), sendo realizado um furo central nesta tampa, de forma a permitir a conexão com o novo reservatório de acrílico.

Figura 5.30: Peça guia/reservatório de entrada (equipamento inicial)



Fonte: O autor

Figura 5.31: Cabeçote superior definitivo



Fonte: O autor

O acoplamento dos cabeçotes ao corpo das amostras é feito mediante o uso de vaselina, que auxilia na impermeabilização do sistema além de facilitar o encaixe do tubo de

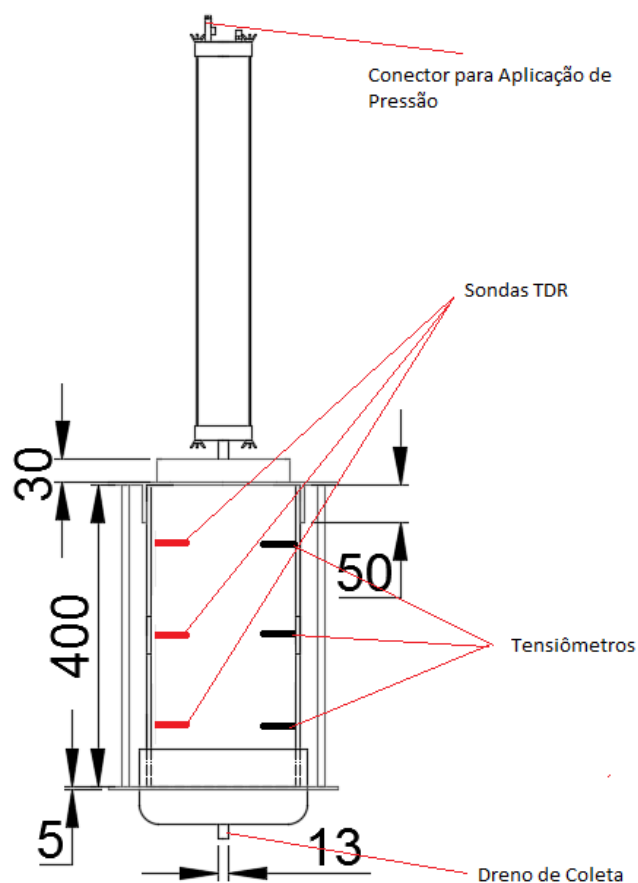
PVC na cavidade dos cabeçotes. Além disto, as laterais superiores dos tubos de PVC dos permeômetros foram chanfradas para que a geometria destes não danificassem os *o-rings*, podendo causar vazamentos. Antes do encaixe dos cabeçotes, foram posicionadas no fundo de cada cabeçote os filtros de geotêxtil não tecido, que possuem a função de impedir que as partículas finas sejam movimentadas para fora do corpo de prova ao longo do fluxo. Antes da implantação dos cabeçotes também é necessário encaixar a abraçadeira que fixa a coluna de percolação na torre do conjunto. Após o encaixe dos cabeçotes, os quatro tirantes rosqueados são posicionados e as roscas são apertadas, finalizando parcialmente a montagem da coluna de percolação, ficando pendente apenas o seu posicionamento na torre e a implantação das sondas do sistema de instrumentação.

Sondas (TDR, FDR E Tensiômetros)

Nos dois primeiros ensaios foram utilizadas apenas as sondas TDR (MP306, ICT, Austrália) para registrar o avanço da frente de umidade (descritas na sequência). por conta da indisponibilidade dos outros equipamentos. No ensaio do corpo de prova CP1 do Solo Vermelho foram implantadas sondas às profundidades de 10, 20 e 30 cm a partir do topo do corpo de prova. No ensaio com o corpo de prova CP2 do Solo Vermelho, foram implantadas as sondas TDR às profundidades de 15 e 30 cm, já que havia apenas duas sondas disponíveis. Os resultados emitidos por estas sondas são obtidos e armazenados por um “*software*” instalado em um computador.

Quanto as sondas FDR (5TE, Decagon, Estados Unidos) e dos tensiômetros (MPS6, Decagon, Estados Unidos), para medidas de umidade e sucção no solo, respectivamente, foi definida a utilização de 3 sondas de cada tipo nas profundidades de 10, 20 e 30 cm a partir do topo do corpo de prova. O armazenamento dos dados foi feito utilizando o Data Logger (EM50, Decagon, Estados Unidos) descrito a seguir e estes dados foram lidos e exportados através do Software (*ECH2O Utility*, Decagon, Estados Unidos) em formato de arquivo-texto o qual pode ser importado pelas planilhas usuais. A seguir serão descritos estes três equipamentos com mais detalhes.

Figura 5.32: Posicionamento dos Tensiômetros e Sondas FDR



Fonte: O autor

Sondas TDR

Segundo Cociani *et al.* (1996), a técnica de Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR) mede a velocidade de propagação de um pulso eletromagnético, ou tempo que um pulso emitido levar para retornar ao sistema após percorrer uma sonda instalada no solo. Esta velocidade está relacionada com a constante dielétrica do meio, que, no caso dos solos, é função da umidade, da textura, da porosidade e da salinidade.

Nos dois primeiros ensaios de coluna monitorada foram utilizadas sondas TDR (*Time Domain Reflectometry*) para acompanhar o avanço da frente de umidade ao longo da infiltração do fluido percolante.

Neste trabalho, foram utilizadas as sondas TDR do modelo MP306 produzido pelo fabricante ICT. São sondas compostas por 4 hastes pelas quais os pulsos percorrem para que sejam gerados os dados de velocidade e relacionados com a constante dielétrica ou umidade. A precisão e a resolução da sonda para a leitura de umidade volumétrica são apresentadas na Tabela 5.10 e a foto da sonda MP306 é exibida na Figura 5.33.

Figura 5.33: Sonda TDR MP306



Fonte: ICT (2014)

Tabela 5.10: Precisão e Resolução das Sondas TDR MP306

Descrição	Precisão	Resolução
Umidade Volumétrica	Calibração típica em solos minerais 0,03 m ³ /m ³ (± 3%) Usando calibração específica do meio: ± 0,01 (± 1%)	0.01%

Fonte: ICT (2014)

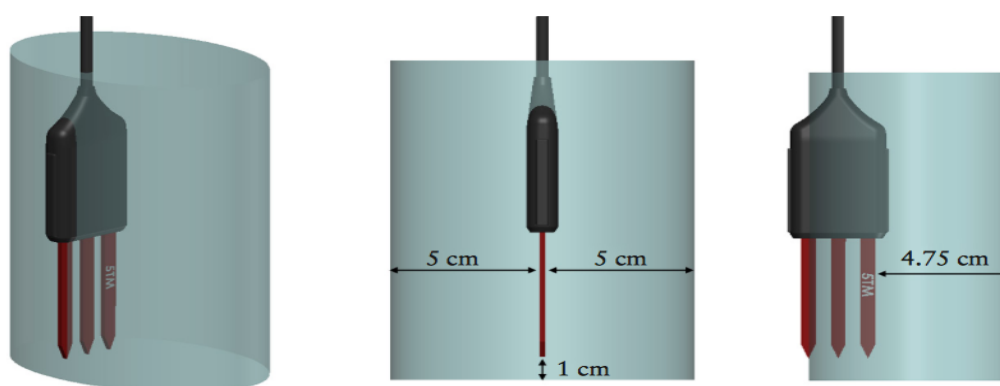
Foi utilizado o próprio sistema de aquisição do GEOAMB nas leituras dos dados de TDR, e para isto todas as sondas foram calibradas previamente à sua utilização, utilizando-se de corpos de prova com índices físicos conhecidos e submetidos a um processo de umedecimento gradual.

Sondas FDR

As sondas FDR (Reflectometria com Domínio da Frequência) foram acopladas na coluna de percolação para permitir o monitoramento da umidade ao decorrer do tempo de ensaio. O modelo das sondas utilizadas foi o 5TE - Sensor de Umidade, Condutividade Elétrica e Temperatura do solo, produzidos pela *Decagon Devices*[®]. Segundo a *Decagon Devices* (2017), todas as três medições (conteúdo volumétrico de água, temperatura e Condutividade Elétrica) são realizadas independentemente com o 5TE. O modelo 5TE possui um formato de garfo com três hastes de pontas finas (dimensões 10 cm x 3,2 cm x 0,7 cm), onde no centro das mesmas há um parafuso responsável por emitir frequências em ondas de 70 Mhz, o que minimiza os efeitos da salinidade e textura, tornando o 5TE preciso na maioria dos solos. O 5TE mede a temperatura com um *termistor onboard*, e a condutividade elétrica usando um conjunto de eletrodos de aço inoxidável. A temperatura e condutividade elétrica são calibrados de fábrica para todos os tipos de solo. A velocidade de medição da sonda FDR 5TE é de 150ms (milissegundos). A precisão, a resolução e a amplitude de utilização do equipamento estão descritas na Tabela 5.11:

As sondas consideram um volume de influência para medição dos parâmetros, o que é ilustrado na Figura 5.34.

Figura 5.34: Volume de Influência na Medição das Sondas 5TE



Fonte: Decagon Devices (2010)

Tabela 5.11: Precisão de Sonda 5TE - Sensor de Umidade, CE e Temperatura do solo

Descrição	Precisão	Resolução	Amplitude
Constante	De 1 – 40: $\pm 1 \epsilon a$	De 1 – 20: 0,1 ϵa	1 (ar) a 80
Dielétrica (ϵa)	De 40 – 80: $\pm 15\%$	De 20–80: $< 0,75 \epsilon a$	(água)
Umidade Volumétrica	Típico em solos minerais com CE < 10 dS/m: $\pm 0,03 \text{ m}^3/\text{m}^3$ ($\pm 3\%$) Usando calibração específica do meio: $\pm 0,01 - 0,02 \text{ m}^3/\text{m}^3$ ($\pm 1 - 2\%$) em qualquer meio poroso	De 0 a 50%: 0,0008 m ³ /m ³ (0,08% CVA)	N/A
Condutividade Elétrica (CE)	$\pm 10\%$ de 0 a 7 dS/m, com calibração do usuário necessária acima de 7 dS/m	De 0 a 7 dS/m: 0,01 dS/m De 7 a 23 dS/m: 0,05 dS/m	0 - 23 dS/m
Temperatura	$\pm 1^\circ\text{C}$	0,1 $^\circ\text{C}$	-40 - 50 $^\circ\text{C}$

Fonte: Decagon Devices (2010)

Tensiômetros

Além da medida do conteúdo de água ao longo dos ensaios com as sondas FDR e TDR, foram também utilizados tensiômetros posicionados diametralmente opostos às sondas FDR, para medida da sucção intersticial. A hipótese é que numa frente de fluxo horizontal e desprezando-se os tempos de respostas dos equipamentos, possa se obter medidas concomitantes de umidade e sucção do solo, valores necessários para a determinação de características como a curva de retenção dos materiais empregados. A sonda utilizada (Modelo MPS-6, Decagon Devices[®]) é um sensor que oferece leituras de potencial matricial e temperatura para longos períodos em qualquer profundidade e sem ser afetado por sais. A amplitude do MPS-6 vai da capacidade de campo até seco ao ar, segundo o fabricante (DECAGON DEVICES[®], 2017). Os sensores MPS-6 são compostos de um sensor de conteúdo de umidade e um substrato poroso com uma curva de retenção de umidade conhecida. Após se equilibrar energeticamente o conteúdo de água material poroso com o conteúdo de água do solo que está ao seu redor, o sensor de umidade mede a umidade do material poroso, e o sensor utiliza a sua curva de retenção para traduzir este valor de umidade para potencial hídrico (DECAGON DEVICES[®], 2017).

Figura 5.35: Sonda MPS-6



Fonte: Decagon Devices® (2017)

A velocidade de medição, assim como a sonda 5TE, é de 150ms (milissegundos). A precisão, a resolução e a amplitude de utilização das sondas MPS-6 estão descritas na Tabela 5.12.

Tabela 5.12: Precisão de Sonda MPS-6 – Potencial Hidráulico e Temperatura do solo

Descrição	Precisão	Resolução	Amplitude
Potencial Hidráulico	(± 10% +2 kPa) de leitura de -9 kPa à -100 kPa	0,1 kPa	-9 à -100.000 kPa
Temperatura	± 1°C	0,1°C	-40°C à 60°C

Fonte: Decagon Devices (2017)

Armazenador De Dados Digital

Para armazenar os dados lidos pelas sondas FDR e Tensiômetros, foi utilizado o armazenador de dados digital do modelo EM50. O EM50 é um armazenador de dados (“*data logger*”) projetado para alimentar, ler e registrar dados de até 5 sensores. Todos os sensores da Decagon funcionam com o Em50 sem necessidade de programação. (DECAGON DEVICES®, 2017)

O Em50 tem 5 portas para sensores e uma porta COM, serial, sendo configurado para ser plugado a um laptop ou computador de mão na porta COM. O Software “*ECH2O Utility*” oferece janelas de configurações onde você nomeia o armazenador, configure seu relógio

interno, seleciona o tipo de sensor em cada porta, e especifica a frequência de leituras. (DECAGON DEVICES®, 2017)

5.1.3.2. Compactação dos Corpos de Prova

A compactação dos corpos de prova do Ensaio de Coluna Monitorado foi realizada baseada nos resultados do ensaio de compactação de cada solo (umidade ótima e energia de compactação).

Primeiramente, as amostras de solo deformadas foram submetidas à secagem, destorroamento e peneiramento (em malha # 4).

Após o peneiramento, a quantidade de solo estimada para confecção de um corpo de prova foi separada e foi determinada a sua umidade higroscópica. Em posse da umidade e da massa do solo separado, foi calculada a quantidade de água a ser adicionada para que se alcançasse a umidade ótima de compactação.

Após a homogeneização, todo o solo foi deixado em repouso em um saco plástico de 40 L durante o período de 24 horas. Após este tempo, foi medida novamente a umidade através de dois pontos e, caso o valor estivesse na faixa de $W_{ot} \pm 1\%$, a amostra estaria apta à compactação, caso contrário, se repetiria a etapa de dosagem de água. Garantida a umidade do solo na faixa admissível da umidade ótima, a massa de solo de cada camada foi separada em pequenos sacos plásticos, facilitando a organização durante a compactação.

Antes de iniciar a compactação o tubo de PVC ranhurado foi fixado no cabeçote inferior visando a não ovalização do mesmo durante a compactação. Após esta etapa, despejou-se o volume de solo equivalente a primeira camada, realizando o nivelamento deste e possibilitando a aplicação dos golpes determinados. O soquete utilizado na compactação possuía altura de queda padrão de 45 cm e peso de 4,50 kgf. As especificações de compactação para cada tipo de corpo de prova estão descritas na tabela 5.13.

Tabela 5.13: Especificações de Compactação dos Corpos de Prova

Descrição	Energia de Compactação	Peso por Camada (g)	Nº de Golpes por Camada
Solo Várzea	Proctor Normal (5,95 kgf.cm/cm ³)	1485,17	23
Solo Vermelho	Proctor Modificado (27,8 kgf.cm/cm ³)	1827,71	115
Solo Piçarra	Proctor Normal (5,95 kgf.cm/cm ³)	1596,60	23
Solo Piçarra	E = (9,00 kgf.cm/cm ³)	1646,50	34
Solo Piçarra	Proctor Intermediário (12,9 kgf.cm/cm ³)	1700,19	49

Fonte: O autor

Depois da compactação, cada camada foi escarificada para melhor aderência com a camada posterior. Todos os corpos de prova do ensaio de coluna monitorado foram compactados em 15 camadas. Para permitir a compactação das últimas camadas e impedir a deformação do tubo de PVC foi desenvolvido um colarinho metálico, o qual é apresentado na Figura 5.36.

Figura 5.36: Colarinho superior de compactação e cabeçote inferior, fixados no corpo de prova



Fonte: O autor

5.1.3.3. Montagem do Ensaio

Concluída a compactação dos corpos de prova, iniciou-se a fase de montagem dos ensaios. Primeiramente, foram encaixadas na torre de sustentação a bandeja auxiliar e a abraçadeira de fixação do corpo de prova. Em seguida, o corpo de prova foi fixado na abraçadeira através de aperto do parafuso de regulagem. Fixado o corpo de prova, se prosseguiu com a implantação dos cabeçotes superior e inferior, finalizada ao se regular os tirantes de travamento. Tanto o cabeçote superior quanto o cabeçote inferior foram testados contra vazamento antes da utilização.

Após a implantação dos cabeçotes, visando a implantação das sondas, foram executados pré-furos no PVC e solo com o auxílio de broca mecânica e de outras ferramentas auxiliares.

No caso das sondas TDR, foram apenas executados furos com a broca mecânica e cravadas as hastes da sonda no solo.

No caso das sondas FDR e dos tensiômetros, os pré-furos foram executados com dimensões ligeiramente superiores às dimensões das sondas para que o contato integral com o solo fosse garantido. Em casos que o pré-furo ficou maior que o previsto, houve o preenchimento com o próprio solo na umidade ótima até que a sonda encaixasse de forma justa. Antes da implantação das sondas FDR e dos tensiômetros, também foi realizada uma escavação com forma cilíndrica com centro no eixo da sonda, desde a parede do PVC a 1 cm em direção ao centro do corpo de prova. Esta escavação, após a implantação da sonda, foi preenchida com silicone, visando diminuir os vazamentos na zona de interface entre a sonda, o solo e o tubo PVC.

Finalizada a vedação com o silicone, foram fixadas capas emborrachadas ao redor do silicone que cobre a sonda utilizando lacres plástico e fios de cobre, conforme apresenta a Figura 5.37.

Figura 5.37: Vedação das Sondas



Fonte: O autor

Após a conclusão da implantação e vedação das sondas, instalou-se o reservatório e, no caso de ensaios com pressão, conectou-se as mangueiras do sistema de pressão, finalizando a montagem do equipamento. Antes do início da percolação dos fluidos foi necessário esperar a estabilização dos valores lidos pelo tensiômetro. Quando o tensiômetro é colocado em contato com o solo, a água presente no solo migra para os seus poros e as leituras nos tensiômetros apenas estabilizam após o equilíbrio de sucção ser alcançado.

5.1.3.4. Execução do Ensaio

Concluída a montagem do aparato experimental, prosseguiu-se para a execução do Ensaio de Coluna Monitorada. O ensaio foi iniciado com o abastecimento do reservatório e, no caso dos ensaios com as amostras compactadas na energia Proctor modificado, devido a sua menor permeabilidade, a aplicação de pressão para incremento do gradiente hidráulico. Na Tabela 5.14 são apresentados os índices físicos de cada Corpo de Prova ensaiado:

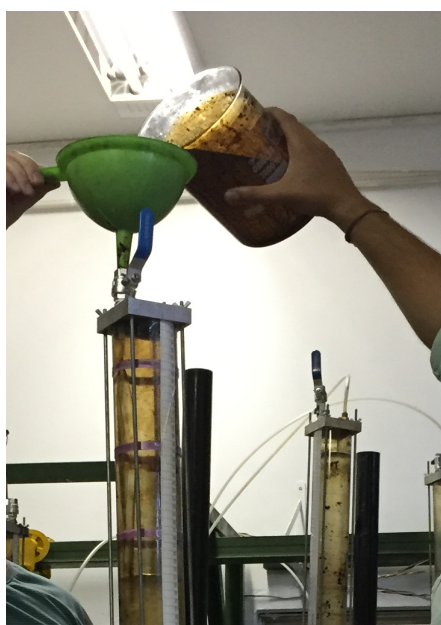
Tabela 5.14: Índices físicos dos CPs dos Ensaios de Coluna Monitorada

Solo	CP	E (kgf.cm/cm ³)	w (%)	ρ_d (g/cm ³)	n	V _{poros}	Altura (cm)	Volume (cm ³)	Peso (g)
Vermelho	1	PM 24,15	8,27	2,08	0,23	2665	40,00	11.581	26.141,23
Vermelho	2	PM 24,15	11,50	2,03	0,25	2738	38,00	11.002	24.951,23
Vermelho	3	PM 24,15	7,87	2,04	0,25	2857	40,00	11.581	25.482,75
Várzea	1	PN 5,95	14,81	1,61	0,41	4736,	40,00	11.581	21.473,23
Várzea	2	PN 5,95	15,07	1,61	0,41	4754	40,00	11.581	21.429,23
Várzea	4	PN 5,95	14,03	1,61	0,41	4749	40,00	11.581	21.181,23
Piçarra	1	PN 5,95	15,16	1,80	0,36	4016	39,00	11.291	21.282,75
Piçarra	4	PI 12,01	13,70	1,89	0,32	3647	39,00	11.291	24.215,00
Piçarra	5	PI 12,01	13,76	1,91	0,32	3653	40,00	11.581	25.128,00
Piçarra	6	PI 12,01	13,64	1,87	0,33	3701	39,00	11.291	24.030,00
Piçarra	8	9,00	15,87	1,84	0,34	3909	39,50	11,436	24.300,00
Piçarra	9	9,00	13,38	1,84	0,32	3717	40,70	11783	25.479,00

Fonte: O Autor

No momento do primeiro abastecimento do reservatório foi coletada uma amostra do fluido para a realização da caracterização química, conforme descrito na seção 5.1.2.

Figura 5.38: Abastecimento do Reservatório



Fonte: O autor

Durante todo o ensaio foi monitorada, periodicamente, a altura da coluna do reservatório. Deste modo, foi possível obter tanto a vazão do fluido no reservatório quanto a carga hidráulica aplicada (no caso dos ensaios com pressão, utilizou-se também um manômetro analógico conectado ao sistema).

Na fase inicial não saturada do ensaio, antes da passagem da frente de umedecimento, até a estabilização das leituras de sucção e umidade, os armazenadores de dados (*data logger* ou *software* no computador) registraram periodicamente os valores lidos pelos tensiômetros e pelas sondas FDR e TDR. Após a estabilização das leituras em todas as sondas dos corpos de prova, o monitoramento das sondas foi dispensado (leitura de umidade e sucção).

Na extremidade de cada dreno foi colocado um frasco de vidro com capacidade de aproximadamente 250 cm³ com uma vedação incipiente através de uma tampa de PVC, conforme mostra a Figura 5.39.

Figura 5.39: Frasco de vidro para coleta de efluente

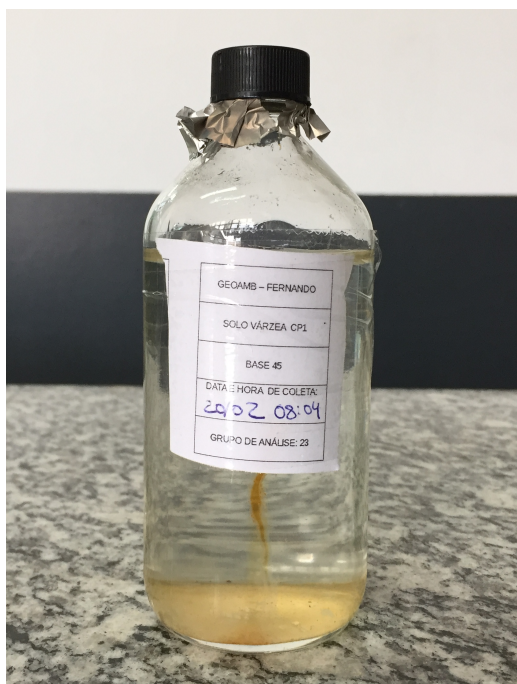


Fonte: O autor

As coletas de efluentes foram realizadas visando a que o volume coletado fosse sempre próximo a 200 cm³. No momento da coleta, a amostra de fluido e o frasco de vidro foram pesados, permitindo a mensuração do volume, e em seguida, foi colocado um papel-

alumínio e o frasco foi fechado com uma tampa rosqueada. O papel-alumínio tem a função de isolar o fluido da tampa, já que, como esta é composta por material orgânico, poderia haver absorção dos hidrocarbonetos influenciando nos resultados das análises químicas. Após o acondicionamento das amostras, estas foram mantidas a 5° C até o momento da caracterização química. As análises foram realizadas com amostras de aproximadamente 400 cm³, ou seja, aproximadamente o conteúdo de dois frascos, ou duas leituras consecutivas.

Figura 5.40: Efluente devidamente acondicionada



Fonte: O Autor

Como o volume do reservatório é relativamente pequeno comparado ao volume total a ser percolado no ensaio, houve a necessidade de algumas recargas durante o ensaio. Ao realizar as recargas, primeiramente se registrava o volume contido no reservatório e depois o volume final após a descarga. Desta maneira se controlou o volume acumulado percolado. No caso dos ensaios com linha de pressão foi necessário parar o ensaio durante o abastecimento, o que, devido ao curto espaço de tempo necessário para esta manobra, não afetou os resultados. Em função do reabastecimento e da longa duração dos experimentos, foram retiradas amostras dos reservatórios ao longo do ensaio como forma de monitorar a concentração de entrada.

Os ensaios foram finalizados quando se obteve a concentração do efluente igual à concentração do reservatório ou ao se obter diversas medidas com concentração constante ou com pequena variação.

5.1.3.5. Caracterização do Fluido Percolado

Foram realizados nos fluidos percolados os mesmos ensaios de caracterização que foram realizados nos fluidos de entrada do ensaio: concentração de HTP, condutividade elétrica (CE), potencial de hidrogênio (pH), concentração de cátions e adicionalmente foi realizado um ensaio de contagem microbiana para o solo várzea, devido à suspeita de ocorrência de degradação biológica dos hidrocarbonetos.

Em função do pequeno volume obtido no ensaio do Solo Vermelho, a determinação da concentração de cátions ficou comprometida para este solo. Para os demais solos, os fluidos foram caracterizados alternadamente entre concentração de HTP e concentração de cátions a cada 400 ml. Os resultados obtidos através da caracterização dos fluidos percolados auxiliaram a obtenção dos parâmetros de interesse bem como serviram para elucidar alguns fenômenos relativos à interação fluido-sólido, que ocorreram durante o ensaio.

5.1.3.6. Caracterização do Solo após o Ensaio

Foram realizados ensaios para determinação dos Sólidos Totais Voláteis (STV), ensaios de Fluorescência de Raio-X (FRX) e e adicionalmente foi realizado um ensaio de contagem microbiana para o solo várzea, devido à suspeita de ocorrência de degradação biológica dos hidrocarbonetos.

Para a realização dos ensaios de STV foram retiradas três alíquotas do topo da coluna e três alíquotas da base da coluna. Avaliando a diferença de concentração de material orgânico antes e depois do ensaio e em diversas cotas da coluna, foi possível verificar a ocorrência da adsorção e filtração dos hidrocarbonetos além da verificação da criação de filme no topo da amostra.

Nos ensaios FRX foram retiradas três amostras do topo da coluna e foi seguido o mesmo procedimento descrito na seção 5.1.1.

5.1.3.7. Determinação Dos Parâmetros De Interesse Dos Ensaio De Coluna Monitorada

Condutividade Hidráulica Saturada Ao Longo Do Tempo

A condutividade hidráulica saturada em cada período de tempo foi calculada utilizando a Lei de Darcy, ou seja, a partir da equação (3):

$$Q = k \cdot i \cdot A \quad \text{ou} \quad k = \frac{Q}{i \cdot A} \quad (3)$$

A vazão (Q) no reservatório e na saída da coluna foi determinada através da razão entre a variação do volume de fluido em cada recipiente (ΔV) e o respectivo intervalo de tempo (Δt). A área A equivale à área da seção transversal do corpo de prova. O gradiente foi determinado pela razão entre a diferença de potencial total ($\Delta \psi$) entre o topo e a base do corpo de prova e o comprimento do corpo de prova (L), conforme a equação 37 .

$$i = \frac{(\psi_{\text{fluido}} + \psi_{\text{sobrepressão}} + L)}{L} \quad (37)$$

Onde:

ψ_{fluido} = potencial devido à pressão exercida pela coluna de fluido (L)

$\psi_{\text{sobrepressão}}$ = potencial devido à pressão exercida pelo ar comprimido (L)

L = comprimento do corpo de prova (L)

Curva De Condutividade Hidráulica Não Saturada (Método Do Perfil Instantâneo)

Nos ensaios de coluna monitorada com sondas FDR e tensiômetros foi possível determinar a curva de condutividade hidráulica não saturada, através do Método do Perfil Instantâneo. Nestas condições, apenas para os ensaios utilizando o Solo Piçarra nas energias de compactação acima do Proctor Normal não foi possível obter estas curvas já que a umidade de compactação era muito próxima à umidade de saturação do solo, pondo em xeque a acurácia dos cálculos a serem realizados.

O método do perfil instantâneo permite que se utilize a equação de Richards, ao longo do umedecimento da coluna, para obtenção da curva de condutividade hidráulica. No caso do

ensaio de coluna monitorada, obtém-se o seguinte problema de valor de contorno, durante a infiltração da água de produção:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left\{ k(\theta) \frac{\partial \psi}{\partial z} \right\} \quad (38)$$

Onde:

θ = umidade volumétrica do solo;

t = tempo de redistribuição (T),

z = coordenada vertical de posição (L),

ψ = potencial total da água no solo, (L)

$k(\theta)$ função de condutividade hidráulica em função de θ (L/T).

Obtém-se, pela integração da equação de Richards com relação às profundidades, entre os limites z_1 e z_2

$$k(\theta) = \frac{\int_0^z \left| \frac{\partial \theta}{\partial t} dz \right|}{\frac{\partial \psi}{\partial z}} = \frac{\left| \frac{\partial Wz}{\partial t} \right|}{\frac{\partial \psi}{\partial z}} \quad (39)$$

Onde:

Wz = armazenagem de água no solo (L^3/L^2) entre a profundidade z_1 e a profundidade z_2 .

O valor de $k(\theta)$ é obtido, portanto, pela relação entre a variação de armazenagem entre as profundidades das sondas, z , com o tempo t e a diferença de carga hidráulica $\Delta\psi$, determinados através de medidas simultâneas de umidade e de potencial total ao longo da coluna de solo durante a infiltração da água.

O gradiente potencial total é calculado, utilizando o conceito de diferenças finitas e as medidas realizadas nos pontos de instrumentação, por:

$$\frac{\partial \psi_t}{\partial z} \approx \frac{\psi_{tz2} - \psi_{tz1}}{\Delta z} \quad (40)$$

Onde:

ψ_{z1} = potencial total da água no solo na sonda z_1 (M/LT²)

ψ_{z2} = potencial total da água no solo na sonda z_2 (M/LT²)

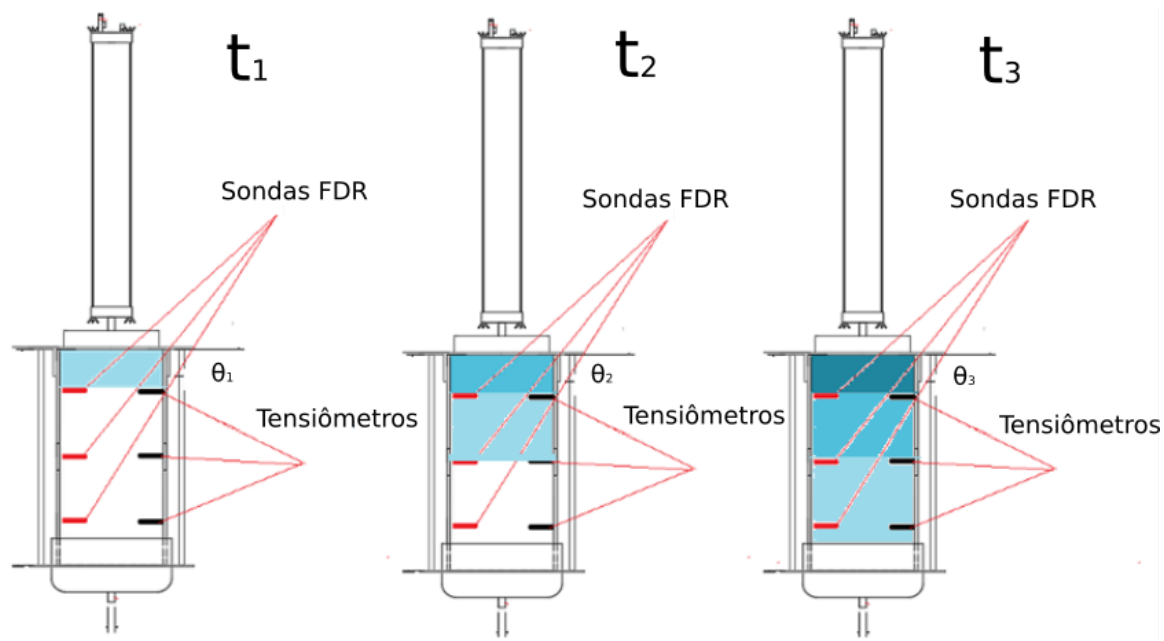
Δz = diferença de cotas entre as sondas (L)

A curva de condutividade hidráulica obtida através do Método do Perfil Instantâneo foi comparada com aquela obtida através da Curva de Retenção, utilizando a equação de Van Genuchten (1980), apresentada na seção 4.4.2.1.

Curva De Retenção Do Solo

Nos ensaios de coluna monitorada com sondas FDR e tensiômetros foram determinadas as curvas de retenção do solo relacionando os valores medidos para cada sonda em cada instante. Neste caso, supõe-se que a frente de umedecimento avança uniformemente ao longo da coluna. Assim, para cada par de sondas (FDR + tensiômetro) se obteve uma curva, cuja umidade mínima seria a umidade de compactação do solo. Assim como o que aconteceu em relação ao Método do Perfil Instantâneo, apenas para os ensaios utilizando o Solo Piçarra nas energias de compactação acima do Proctor Normal não foi possível obter estas curvas, já que a umidade de compactação já era muito próxima à umidade de saturação do solo. Na Figura 5.41 é apresentado o esquema de determinação das curvas de retenção nos ensaios de coluna.

Figura 5.41 Esquema de determinação das curvas de retenção nos ensaios de coluna



Onde: $t_1 < t_2 < t_3$ e $\theta_1 < \theta_2 < \theta_3$

Fonte: O Autor

Curva De Chegada E Tratamento Matemático

Os parâmetros de migração de contaminante necessários para a construção da curva de chegada foram determinados em função dos seguintes parâmetros: concentração de HTP identificados nas amostras coletadas; tempo das coletas; concentração inicial da solução no reservatório; volume de poros percolados acumulados. Para construir a curva de chegada, os resultados obtidos são plotados na forma de C/C_0 (concentração no reservatório de coleta/concentração inicial) versus número de volumes de poros percolados (V_p) ou tempo (t).

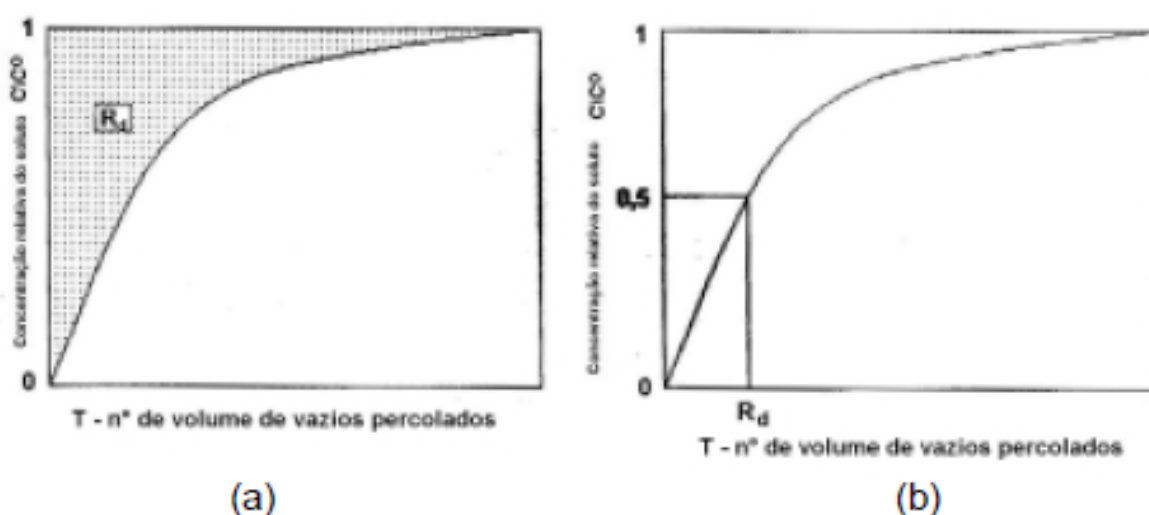
Fator Retardamento (R_d)

No ensaio de coluna o valor do fator de retardamento (R_d) pode ser determinado através de dois métodos convencionais:

- (1) diretamente da curva de chegada onde $R_d = V_p$ para $C/C_0 = 0,5$ (FREEZE e CHERRY, 1979 apud BASSO, 2003) (ver Figura 5.42b);
- (2) indiretamente, a partir do cálculo da área acima da curva de chegada (SHACKELFORD, 1994) (ver Figura 5.42a).

Quando existe maior influência do transporte por advecção e dispersão mecânica decorrente de altas taxas de fluxo, (n° de Peclet > 50) utiliza-se o R_d determinado diretamente da curva de chegada na condição $C/c_0 = 0,5$ (FREEZE e CHERRY, 1979, apud SHACKELFORD, 1994). Entretanto, na condição de fluxo de maior influência do transporte por difusão, decorrente de baixas taxas de fluxo, (n° de Peclet < 50), calcula-se o R_d a partir da área acima da curva de chegada. (SHACKELFORD, 1994).

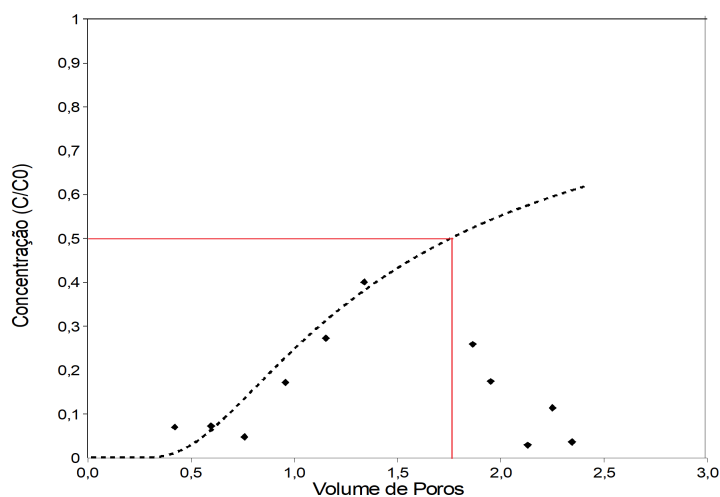
Figura 5.42: Métodos de Determinação de R_d



Fonte: Leite (2000).apud Basso (2003)

No caso dos solos onde ocorreu o fenômeno do decaimento, o R_d foi determinado pelo método (1), ou seja diretamente da curva de chegada onde $R_d = V_p$ para $C/C_0 = 0,5$, através da extrapolação do ajuste aos pontos iniciais da curva de chegada, conforme mostra a Figura 5.43.

Figura 5.43: Extrapolação da Curva de Chegada para determinação de R_d para o caso dos ensaios com decaimento



Fonte: O Autor

Dispersão Hidrodinâmica (D_h)

Para obter o valor de D_h (Coeficiente de Dispersão Hidrodinâmica) se ajustou as equações analíticas aos dados experimentais, considerando o valor de R_d fixo (determinado conforme apresentado anteriormente). O valor de D_h pôde ser definido de acordo com a equação (41):

$$D_h = \alpha \cdot v_s + \omega \cdot D_0 \quad (41)$$

Onde:

α é o coeficiente de dispersividade na direção considerada (L);

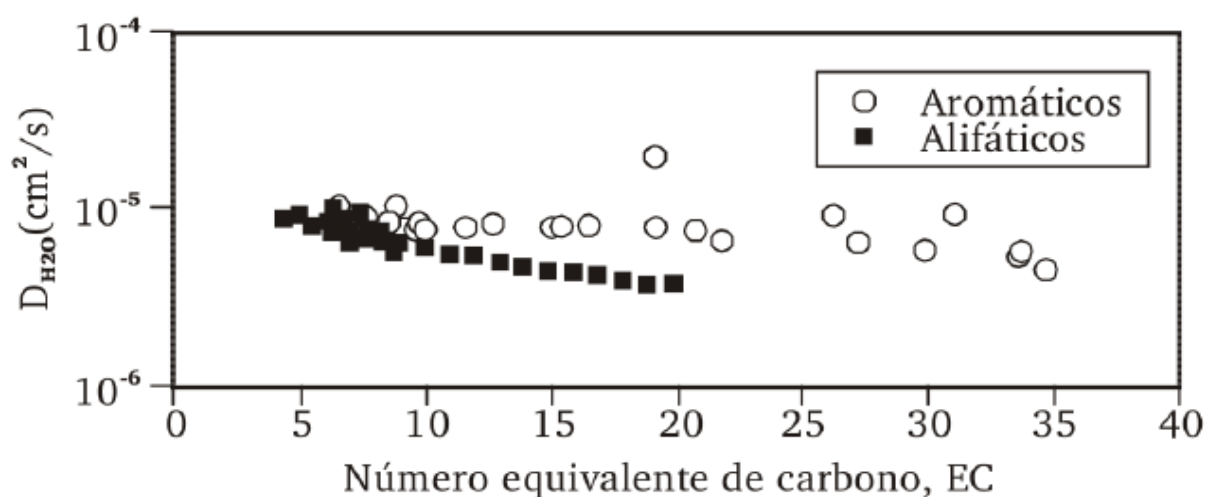
v_s = velocidade de percolação (L/T);

D_0 = Coeficiente de difusão molecular em solução (L^2/T);

ω =coeficiente de tortuosidade

A estimativa do coeficiente de difusão dos compostos orgânicos na água (D_0) foi realizada com o uso dos dados apresentados na Figura 5.44, em função do número equivalente de carbono, EC.

Figura 5.44: Variação de valores de D_0 (cm^2/s) em função do número de carbonos equivalente



Fonte: Gustafson *et al.* (1997)

A estimativa do fator de tortuosidade foi feita com o uso da Equação 42, utilizada por Zhang *et al.* (2005) e Parker (1989) para estimativa deste fator em função da porosidade e grau de saturação do meio.

$$w = n^{0,33} \cdot S_r^{0,9} \quad (42)$$

Onde:

n é a porosidade

S_r o grau de saturação das amostras

Assim, os valores de α foram definidos a partir dos valores de D_h ajustados e dos valores de v_s experimentais. Para os casos onde houve redução da condutividade hidráulica, o valor de D_h foi definido em função da velocidade média do ensaio ($v_{s_m\acute{e}dia}$).

Soluções analíticas para modelagem das Curvas de Chegada

Para os ensaios que não apresentaram nem redução da velocidade (v_s) nem decaimento nos valores de C , a modelagem se baseou na equação 35 apresentada na seção 4.5.4 (LAPIDUS e AMUNDSON 1952, OGATA e BANKS 1961):

Para os ensaios onde houve apenas a redução de velocidade, adotou-se a forma diferencial da Equação 35 dada por:

$$\frac{dC}{C_0} = \frac{1}{2} \left\{ \frac{-2}{\sqrt{\pi}} \cdot e^{-x_1^2} \cdot dx_1 + e^{(x_2)} \cdot dx_2 \cdot \operatorname{erfc}(x_3) + \frac{-2 \cdot e^{(x_2)}}{\sqrt{\pi}} \cdot e^{-x_3^2} \cdot dx_3 \right\} \quad (43)$$

Onde:

$$x_1 = \frac{Rd \cdot z - v_s \cdot t}{2 \cdot \sqrt{Dh \cdot Rd \cdot t}} \quad (44)$$

$$x_2 = \frac{v_s \cdot z}{Dh} \quad (45)$$

$$x_3 = \frac{Rd \cdot z + v_s \cdot t}{2 \cdot \sqrt{Dh \cdot Rd \cdot t}} \quad (46)$$

Desta maneira, é possível, em uma análise incremental, simular o comportamento da curva considerando a variação da velocidade no tempo sem ônus ao resultado obtido.

Por último, nos casos onde houve tanto diminuição da velocidade quanto a ocorrência de decaimento, adotou-se a forma diferencial da equação 36 (VAN GENUCHTEN,1981; BEAR,1972), apresentada no tópico 4.5.4.

Tal equação é dada na forma incremental por:

$$\frac{dC}{C_0} = \frac{1}{2} \left\{ e^{x_4} \frac{-2}{\sqrt{\pi}} \cdot e^{-x_5^2} \cdot dx_5 + \operatorname{erfc}(x_5) e^{x_4} \cdot dx_4 + e^{x_6} \frac{-2}{\sqrt{\pi}} \cdot e^{-x_7^2} \cdot dx_7 + \operatorname{erfc}(x_7) e^{x_6} \cdot dx_6 \right\} \quad (47)$$

Onde:

$$x_4 = \frac{(v-u) \cdot z}{2 \cdot Dh} \quad (48)$$

$$x_5 = \frac{Rd \cdot z - u \cdot t}{2 \cdot (Dh \cdot Rd \cdot t)^{1/2}} \quad (49)$$

$$x_6 = \frac{(v+u) \cdot z}{2 \cdot Dh} \quad (50)$$

$$x_7 = \frac{Rd \cdot z + u \cdot t}{2 \cdot (Dh \cdot Rd \cdot t)^{1/2}} \quad (51)$$

e

$$u = v \left(1 + \frac{4 \cdot \mu \cdot Dh}{v^2} \right)^{1/2} \quad (52)$$

A solução analítica original considera, além da velocidade constante durante o ensaio, a ocorrência do decaimento de primeira ordem. Como os resultados obtidos através desta solução não permitiram modelar de forma adequada a migração de contaminantes com decaimento, foi proposta a equação diferencial com variação da velocidade e do coeficiente de decaimento ao longo do tempo que será apresentada no capítulo 6 como resultado deste trabalho.

5.1.4. Ensaio Complementares

5.1.4.1. Determinação da Condutividade Hidráulica Saturada

Ensaio complementares para a determinação da condutividade hidráulica saturada foram realizados em dois momentos distintos neste trabalho: primeiramente, no intuito de auxiliar a determinação de energia de compactação a ser utilizada no Solo Piçarra e, posteriormente, visando a ratificar os resultados obtidos nos ensaios de coluna monitorado.

Condutividade Hidráulica Saturada do Solo Piçarra em função da energia de compactação

Conforme foi mencionado no tópico 5.1.1, determinou-se antes de executar os ensaios de coluna monitorada, para o caso das amostras de solo Piçarra, as energias de compactação que resultariam em coeficientes de permeabilidade 1×10^{-4} , 1×10^{-5} e 1×10^{-6} cm/s. Para viabilizar essa correlação, primeiramente se compactou em permeômetros rígidos de PVC amostras do solo piçarra nas energias Proctor Normal, Intermediário e Modificado.

O sistema de percolação utilizado na execução do ensaio com permeômetro rígido é composto basicamente de um reservatório, mangueiras, permeômetro e pipeta graduada fixada em painel. No caso de um dos corpos de prova compactados na energia Proctor Modificado, foi necessário utilizar um reservatório auxiliar com pressão para diminuir o tempo de ensaio. Os ensaios foram realizados com carga variável já que à medida que o fluido entra na pipeta a carga de posição da saída aumenta, diminuindo a diferença de cargas entre a entrada e a saída.

A primeira bateria de ensaios contou com dois corpos de prova de cada energia de compactação, moldados pelo Laboratório de Mecânica dos Solos da Universidade Católica do Salvador. Os índices físicos dos corpos de prova estão apresentadas na Tabela 5.15:

Tabela 5.15: Informações dos CPs do Solo Piçarra da Primeira Bateria de Ensaios

CP	Energia	w (%)	Sr(%)	ρ_d (g/cm ³)	GC (%)	h (cm)	ϕ (cm)	V (cm ³)	Peso (g)
5	PN	13,52	79,61	1,906	100,10	10,391	9,921	803,32	1737,98
10	PN	13,53	79,54	1,905	100,05	10,635	9,888	816,68	1766,18
4	PI	12,12	86,78	2,022	100,35	10,820	9,872	828,24	1877,71
11	PI	12,13	86,41	2,019	100,21	10,948	9,878	838,97	1899,59
3	PM	11,32	87,92	2,068	100,27	10,796	9,870	825,94	1901,07
1	PM	11,47	88,82	2,066	100,20	12,348	9,954	960,97	2213,18

Fonte: O Autor

Onde G.C = Grau de Compactação, Sr = Grau de Saturação, H = altura do CP, ϕ = diâmetro do CP, V = volume do CP

Ao se executar os ensaios da primeira bateria, constatou-se certa inconsistência nos resultados pois, ao contrário do esperado, não foi possível perceber uma tendência clara correlacionando a energia de compactação e a permeabilidade. Diante destes resultados, se

levantou a hipótese de que a fração de pedregulhos ocasionaria a criação de caminhos preferenciais na coluna, já que cerca de 80% do solo seria composto de pedregulho e areia (incompatibilidade entre a textura do solo e o tamanho dos CPs empregados).

Na segunda bateria de ensaios, solicitou-se que as amostras fossem compactadas sem parte da fração de pedregulho do solo piçarra (que fica retida na peneira #4). A nova granulometria está apresentada na seção 5.1.1 e identificada como “Solo Piçarra (Corpos de Prova)”, já que esta fração do solo piçarra foi utilizada para moldar os corpos de provas dos ensaios realizados neste trabalho. Os índices físicos dos corpos de prova utilizados na segunda bateria de ensaios estão apresentadas na Tabela 5.16:

Tabela 5.16: Informações dos CPs Solo Piçarra da Segunda Bateria de Ensaios

CP	Energia	w (%)	Sr(%)	ρ_d (g/cm ³)	GC (%)	h (cm)	ϕ (cm)	V (cm ³)	Peso (g)
3	PN	15,95	79,58	1,788	100,4	10,832	9,870	828,68	1717,87
4	PN	15,91	79,52	1,789	100,5	10,905	9,872	834,74	1730,81
2	PI	14,56	72,87	1,790	100,33	12,388	9,952	963,74	1976,06
I1	PI	14,18	71,21	1,792	100,45	12,712	9,993	996,89	2039,67
G	PM	12,95	74,44	1,876	100,50	12,188	10,014	959,81	2034,25

Fonte: O Autor

Onde G.C = Grau de Compactação, Sr = Grau de Saturação, H = altura do CP, ϕ = diâmetro do CP, V = volume do CP

Em posse dos resultados obtidos da segunda bateria de ensaios de permeabilidade, que se apresentaram conforme o esperado e através da técnica de regressão linear foram determinadas as energias de compactação que provavelmente gerariam solos com coeficientes de permeabilidade ao fluido utilizado de $k=1 \times 10^{-4}$, $k=1 \times 10^{-5}$ e $k=1 \times 10^{-6}$ cm/s

Determinadas as novas energias de compactação foram realizados novamente ensaios de compactação para determinação de umidade ótima e massa específica seca máxima, conforme exposto na seção 5.1.1.

Condutividade Hidráulica Saturada dos Solos Vermelho e Várzea

No intuito de verificar os resultados obtidos a partir dos ensaios de coluna monitorada, foram executados ensaios de permeabilidade com amostras do solo vermelho e do solo

várzea. Estes ensaios foram realizados utilizando permeâmetros flexíveis. Os ensaios de permeabilidade com permeâmetro flexível necessitam de corpos de prova de menor tamanho, o que motivou a escolha deste método por conta da escassez de solo após a realização dos ensaios de coluna monitorada e a sua menor textura em comparação com o solo Piçarra.

O sistema de percolação para os ensaios de permeabilidade com permeâmetro flexível é composto de: célula triaxial de percolação (ver figura Erro: Origem da referência não encontrada), reservatório pressurizado da pressão confinante, reservatório pressurizado de fluido percolante, mangueiras, painel de controle e pipeta graduada fixada em painel (ver Figura Erro: Origem da referência não encontrada) . Os ensaios foram realizados com carga variável em função da baixa permeabilidade esperada para os solos.

Figura 5.45: Permeâmetro Flexível



Fonte: O autor

Figura 5.46: Sistema de Percolação



Fonte: O autor

A compactação dos corpos de prova foi realizada utilizando um compactador de bancada e um molde de PVC bipartido fixado em uma base metálica e confinado lateralmente através de abraçadeiras. A preparação das amostras de solo ocorreu de maneira análoga ao que foi explicado no item 5.1.3. Todos os corpos de prova foram compactados em quatro camadas.

O compactador possuía um soquete com peso de 2,165 kg e foi adotada uma altura de queda de 30 cm. Nas Figuras 5.47 e 5.48 estão apresentados os aparatos utilizados na compactação dos corpos de prova.

Figura 5.47: Base Metálica, Molde de PVC Bipartido e Abraçadeiras



Fonte: O autor

Figura 5.48: Compactador de Bancada



Fonte: O autor

Na tabela 5.17 se apresentam as especificações da compactação dos corpos de prova.

Tabela 5.17: Especificações de Compactação dos Corpos de Prova para Permeâmetro Flexível

Descrição	Energia de Compactação	Peso Médio por Camada (g)	Nº de Golpes por Camada
Solo Várzea	Proctor Normal (5,95 kgf.cm/cm ³)	102,16	5
Solo Vermelho	Proctor Modificado (27,8 kgf.cm/cm ³)	116,05	23

Fonte: O autor

As informações dos corpos de prova utilizados nos Ensaio com Permeâmetro Flexível estão apresentadas na Tabela 5.18.

Tabela 5.18: Informações dos CPs utilizados nos Ensaios com Permeâmetro Flexível

Tipo de solo	CP	w (%)	Sr (%)	ρ_d (g/cm ³)	G.C (%)	H (cm)	ϕ (cm)	V (cm ³)	Peso (g)
Vermelho	1	7,88	71,61	2,080	103,8	9,558	5,251	206,88	464,31
Vermelho	2	7,87	67,65	2,058	102,7	9,488	5,277	207,40	460,57
Vermelho	3	7,86	68,66	2,067	103,2	9,488	5,281	207,72	463,72
Várzea	1	13,64	53,23	1,605	96,45	10,183	5,241	219,57	400,67
Várzea	2	13,25	53,47	1,628	97,83	10,132	5,261	220,14	405,84
Várzea	3	13,51	53,72	1,618	97,23	10,128	5,273	221,06	406,21

Fonte: O Autor.

Onde G.C = Grau de Compactação, Sr = Grau de Saturação, H = altura do CP, ϕ = diâmetro do CP, V = volume do CP, ρ_d = massa específica seca

Na montagem do ensaio, o corpo de prova é colocado no pedestal dentro da câmara com papel-filtro saturado e com pedras porosas saturadas em seus dois extremos. Posteriormente, a membrana de látex é colocada e presa com borrachas de vedação na base e no cabeçote com a finalidade de impedir o fluxo de água entre a membrana e a amostra de solo. Após a montagem do sistema foi iniciada a saturação do corpo de prova através de aplicação de pressão. Quando se constatou a ausência de bolhas nas mangueiras do sistema, foi possível iniciar a execução do ensaio de permeabilidade, conectando a mangueira de saída na pipeta graduada.

Figura 5.49: Montagem do Ensaio de Permeabilidade com Permeâmetro Flexível



Fonte: O Autor

5.1.4.2. Determinação da Condutividade Hidráulica Saturada

Em casos de permeâmetros de carga variável a vazão da água que passa pelo solo pode ser medida pela água que passa pela bureta. Nesse caso, a condutividade hidráulica pode ser calculada pela equação:

$$k = 2,3 \cdot \frac{a \cdot l}{A \cdot \Delta t} \cdot \log \frac{h_i}{h_f} \quad (53)$$

Onde:

Δt = tempo decorrido

a = área do tubo (L^2)

L = comprimento da amostra (L)

A = área da amostra (L^2)

h_i = carga hidráulica inicial (L)

h_f = carga hidráulica final (L)

5.1.4.3. Curvas de Retenção (Métodos Consolidados)

Neste trabalho foram utilizados dois métodos experimentais para a determinação da sucção nas amostras de solo: a câmara de pressão e o psicrômetro (*WP4 Dewpoint Potencial Meter*).

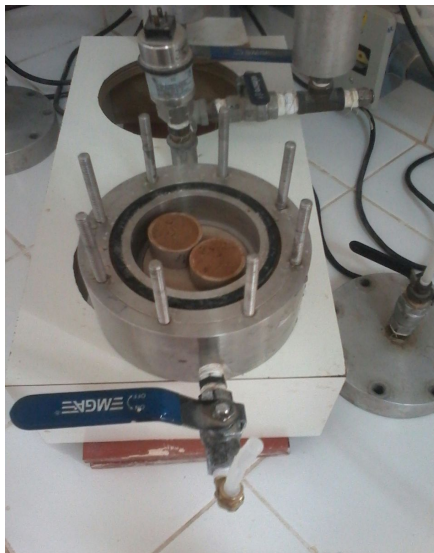
Método Da Câmara De Pressão Ou Câmara De Richards

O método da Câmara de Pressão ou Câmara de Richards é um método baseado no princípio da translação de eixos, onde se utiliza um alto valor de entrada de ar para a expulsão da água da amostra, mantendo-se os valores de pressão na água sempre superiores à pressão atmosférica. Monitora-se a perda fluido da amostra ao longo do tempo, determinando-se a sua umidade após a estabilização da massa. Para a aplicação deste método foram moldados corpos de prova com o auxílio de um anel de PVC com borda biselada.

Antes do início do ensaio, a câmara de pressão foi preenchida com água deionizada e foi aplicada pressão até a saturação da pedra porosa de alto valor de entrada de ar (15 BAR), indicada pela saída da água pelo duto externo. Após a saturação da pedra porosa, foram

colocadas as amostras de solo, as quais foram submetidas à “saturação” por capilaridade, conforme apresenta a Figura 5.50.

Figura 5.50: CPs posicionados na Câmara de Pressão para “saturação” por ascensão capilar



Fonte: O Autor

Finalizada a saturação dos corpos de prova, a câmara de pressão é vedada e então são aplicadas a pressões requeridas de ar e água. Após a vazão de saída ter cessado, os corpos de prova foram extraídos e a umidade foi medida pelo método gravimétrico.

Figura 5.51: Câmara de Pressão vedada durante ensaio



Fonte: O Autor

Método Do Psicrômetro (WP4C Dewpoint Potential Meter)

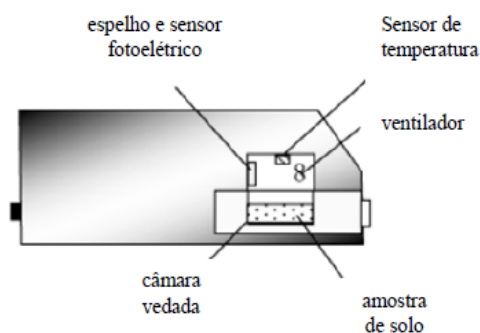
O método do psicrômetro é utilizado para medir o potencial de água em pouco tempo. O princípio de funcionamento deste método está baseado na avaliação da temperatura para a qual o vapor de água presente no ar passa ao estado líquido (ponto de orvalho) na forma de pequenas gotas por via da condensação. O ponto de orvalho revela a pressão parcial de vapor no ar em equilíbrio com a amostra em uma câmara selada para medição.

Através de correlações utilizando a Lei de Kelvin é obtida a sucção total (sucção osmótica somada à sucção matricial) correspondente à umidade relativa. Para a detecção do ponto de orvalho das amostras e medição da respectiva temperatura, o equipamento usa um espelho com temperatura controlada por um refrigerador termoelétrico (Peltier).

Segundo Rocha *et al.* (2014), a detecção em que a condensação aparece pela primeira vez no espelho é registrada por uma célula fotoelétrica devido à mudança do feixe de luz na reflexão e a temperatura do ponto de condensação é registrada por um termoelétrico conectado ao espelho. Ainda segundo estes autores, “para reduzir o tempo de equilíbrio o equipamento possui uma ventoinha para circular o ar dentro da câmara de amostras”.

O método do Psicrômetro foi executado com o uso do equipamento (WP4 Dewpoint Potential Meter, Decagon Devices, Estados Unidos). Neste equipamento, o corpo de prova é colocado em uma cápsula apropriada dentro do equipamento e, em aproximadamente 30 minutos, é determinada a sucção matricial do solo. A Figura 5.52 mostra os principais componentes do equipamento.

Figura 5.52: Esquema gráfico do WP4C



Fonte: Leong *et al.* (2003)

Admite-se que a sucção do solo está em equilíbrio com a energia do vapor de água presente na câmara do WP4C e utiliza-se a Equação 54 para o cálculo da sucção (FREDLUND e RAHARDJO, 1993). Este cálculo é realizado automaticamente pelo equipamento.

$$\psi = -RT \gamma_w \ln(h_r) \ln\left(\frac{h_r}{M_w}\right) \quad (54)$$

Segundo a Decagon Devices (2017), o equipamento possui a precisão e a amplitude descrita na Tabela 5.19.

Tabela 5.19: Precisão e Amplitude do Equipamento WP4C Dewpoint Potencia Meter

Descrição	Precisão	Amplitude
Potencial Hidráulico	De 0.5 até 5 MPa: ± 0.05 MPa* De 5 até 300 MPa: $\pm 1\%$	-0.1 até -300 MPa*

*Observação: Amostras mais úmidas do que -0.5 MPa terão aumentos na percentagem de erro.

Fonte: Decagon Devices (2017)

Os corpos de prova utilizados no equipamento WP4C foram compactados nas mesmas energias utilizadas nos corpos de provas dos permeômetros, com altura aproximada de 10,0 cm e diâmetro de 5,2 cm com o uso do compactador de bancada. A compactação foi realizada em quatro camadas com altura final estimada de 2,5 cm, com as mesmas configurações dos corpos de prova utilizados no ensaio de permeabilidade com permeômetro flexível.

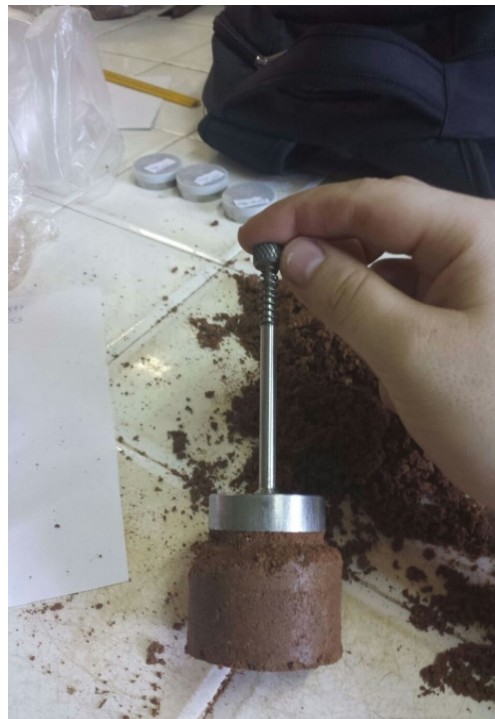
Em posse do solo compactado foi utilizado um mini-cravador junto a um estilete para a retirada dos corpos de provas nas dimensões adequadas ao procedimento. Neste processo, a lateral do corpo de prova cilíndrico foi desgastada ao redor do cravador, facilitando a penetração deste na região superior do corpo de prova cilíndrico.

Figura 5.53: Corpo de Prova



Fonte: O autor

Figura 5.54: Cravador em moldagem do disco



Fonte: O autor

Após a extração, os corpos de prova foram colocados nas cápsulas do WP4C, iniciando-se a pesagem do conjunto cápsula + solo para posterior tratamento de dados. Os ensaios com o WP4C foram realizados tanto para o ramo de secagem quanto umedecimento. Inicialmente, a amostra, que se encontrava na umidade ótima de compactação, foi saturada com água deionizada na própria cápsula em que se encontrava, lá repousando por 48 horas. Após este período, a amostra foi pesada e colocada pela primeira vez no equipamento WP4C, sendo coletado o primeiro ponto de sucção. Posteriormente a este processo a amostra foi colocada na estufa por 1 minuto e deixada em repouso com a cápsula fechada, possibilitando a diminuição da temperatura sem a perda de umidade para o ambiente. Após 20 minutos, a amostra foi novamente pesada e colocada no equipamento WP4C, possibilitando mais uma coleta de sucção da amostra. Tal procedimento foi realizado até a secagem do corpo de prova.

Figura 5.55: Saída de Dados do Equipamento WP4C



Fonte: O Autor

Para a obtenção dos dados no ramo de umedecimento, foi utilizado um geotêxtil no intuito de homogeneizar a adição da água deionizada em todo o CP, além de possibilitar a absorção da água através da ascensão capilar. Com a amostra totalmente seca, se determinou a quantidade de água a ser absorvida para se chegar ao primeiro ponto (tentando coincidir com o último ponto do ramo de secagem). Assim, adicionou-se esta quantidade de água ao geotêxtil colocando-o em contato com o corpo de prova dentro da cápsula. Após este contato, a cápsula foi fechada com a tampa de plástico e colocada na posição invertida, permitindo que o solo ficasse acima do geotêxtil e que toda a absorção da água fosse proveniente de ascensão. Após 1 hora, abriu-se a cápsula, retirando-se o geotêxtil e se pesou o conjunto cápsula + amostra para depois ser inserido no equipamento W4PC. Este processo foi repetido até a saturação do corpo de prova.

Determinação Das Curvas De Retenção De Água

As curvas de retenção obtidas foram modeladas ajustando os valores experimentais às equações de Van Genuchten (1980) e Duplo van Genuchten (CADUCCI *et al.*, 2010) através do método dos mínimos quadrados.

5.2. Modelagem Numérica

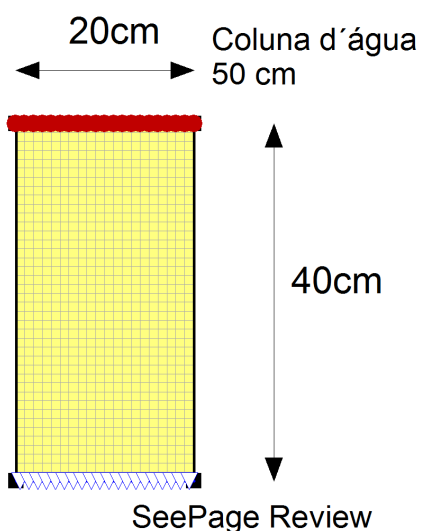
5.2.1. Calibração Da Curva De Condutividade Hidráulica

Foi realizada a modelagem numérica de fluxo transiente para o processo de infiltração da coluna realizando a calibração da curva de condutividade hidráulica.

A calibração da curva de condutividade hidráulica foi realizada utilizando as curvas de retenção do solo obtidas experimentalmente e os valores de umidade ao longo do tempo obtidos através das sondas TDR ou FDR posicionadas na cota -30 cm. A escolha das sondas nestas especificações decorreu de alguns fatores: (1) nos dois primeiros ensaios do solo vermelho apenas havia sondas de umidade, assim, a escolha procurou padronizar os parâmetros; (2) as sondas de umidade (TDR e FDR) apresentaram menor variação nos resultados do que as sondas de sucção (tensiômetros) quando comparados com o que era esperado na condição inicial a partir da umidade de compactação e da curva de retenção do solo.

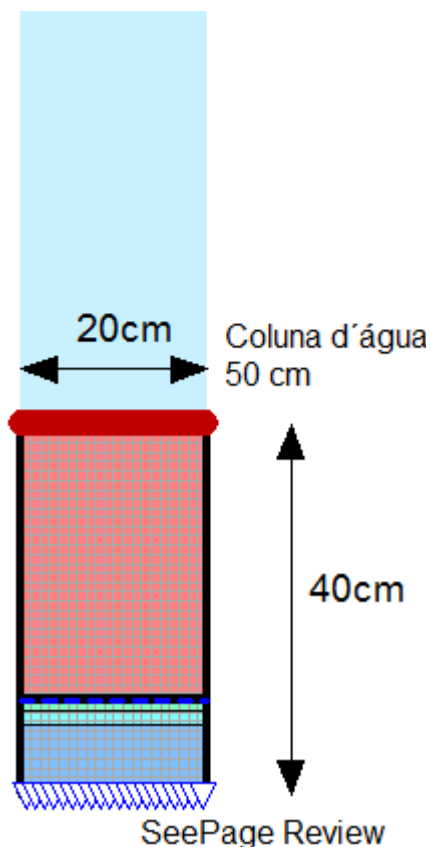
Utilizando o aplicativo SEEP/W foi modelada uma coluna hipotética com dimensões de 20 cm x 40 cm. Para cada ensaio foi cadastrado o solo e as condições de contorno de acordo com o que foi observado no experimento. Como parâmetros do solo foram inseridos: a curva de retenção; a sucção na condição inicial; e a curva de condutividade, esta inicialmente estimada a partir da curva de retenção e da condutividade hidráulica obtida no ensaio de coluna ou, em alguns casos em que houve disponibilidade, da curva de condutividade hidráulica obtida através do método do perfil instantâneo. Como parâmetros da condição de contorno foram inseridos: no topo da coluna, os valores de carga hidráulica média do ensaio; na base da coluna, a condição fluxo unitário igual a zero ($q = 0$) com *seepage review*. Trata-se de uma condições de contorno do tipo “inteligente” do SEEP/W em que o contorno é considerado impermeável, a menos que haja uma tendência de acúmulo de água sobre esta (valores de pressão neutra positivos), situação em que uma condição de contorno $u = 0$ é imposta. Nas figuras 5.56 e 5.57 são apresentadas ilustrações das malhas utilizadas e condições de contorno provenientes da tela inicial (inserção dos dados) e da tela de resultados.

Figura 5.56: Malha utilizada e Condições de Contorno (Tela Inicial)



Fonte: O autor

Figura 5.57: Malha utilizada e Condições de Contorno (Tela de Resultados)



Fonte: O autor

O número de passos da iteração bem como o tempo de modelagem foram determinados de acordo com o tempo necessário em ensaio para que ocorresse a saturação do solo na sonda escolhida.

Após o processamento da modelagem, foi gerado pelo aplicativo um gráfico “umidade x tempo” considerando os resultados do ponto posicionado na cota -30 cm da coluna modelada. A curva fornecida pelo aplicativo SEEP/W foi comparada com a curva traçada segundo os perfis de infiltração do ensaio de coluna. A partir da comparação entre as curvas, foi iniciado um processo iterativo de ajuste manual da curva de condutividade hidráulica do solo até a obtenção de um comportamento similar entre a curva do ensaio e a curva simulada. Os pontos chave alterados neste processo foram o valor de entrada de ar do solo e a inclinação da curva de condutividade hidráulica após este ponto.

5.2.2. Simulações De Vazamentos Em Campo

Foram realizadas simulações tomando como base situações hipotéticas de campo, a fim de avaliar a eficiência de bacias constituídas dos solos utilizados. As simulações numéricas foram realizadas com o uso dos aplicativos SEEP/W (simulação do problema de fluxo) e CTRAN/W (simulação do problema de transporte e solutos), ambos da *Geoslope International*TM. As simulações de vazamentos em campo foram iniciadas após a calibração da curva de condutividade de cada solo. Nesta etapa, além da visualização do avanço da frente de umedecimento e da migração dos contaminantes ao longo do tempo após um vazamento, procurou-se analisar o impacto dos fenômenos observados no ensaio de coluna (redução da condutividade hidráulica e decaimento biológico). Para tal, foram realizadas simulações considerando diversas possibilidades de acordo com o tipo de solo e, em seguida, foram comparado os resultados obtidos. A seção modelada considerou uma espessura da bacia equivalente a 1 m e uma carga hidráulica de 3 m de coluna de fluido (altura representativa de campo em uma situação de ruptura de um tanque de armazenamento). Como a condutividade hidráulica obtida no ensaio de coluna realizado com o Solo Piçarra compactado na energia Proctor Normal não atendeu às especificações da NBR 17505-2 (2015) não foi realizada a modelagem de uma bacia considerando este solo.

Para as bacias modeladas para os solos Vermelho e Piçarra foram consideradas as seguintes variações:

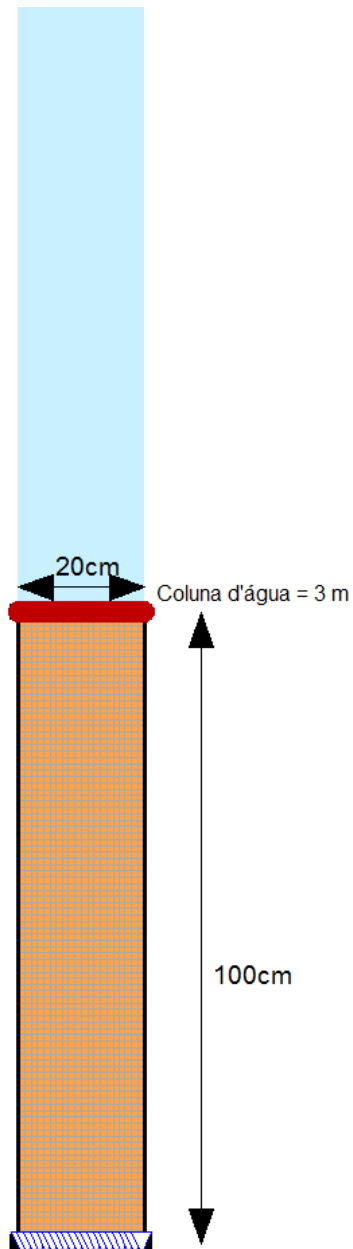
- Condutividade hidráulica constante igual à inicial
- Redução da condutividade hidráulica na percolação de acordo com o que foi observado nos ensaios de coluna.

Para as bacias modeladas para o Solo Várzea foram consideradas as seguintes variações:

- Condutividade hidráulica constante igual à inicial
- Redução da condutividade hidráulica ao longo do tempo de acordo com o que foi observado nos ensaios de coluna.
- Condutividade hidráulica constante igual à inicial com decaimento variando ao longo do tempo.
- Redução da condutividade hidráulica na percolação de acordo com o que foi observado nos ensaios de coluna com decaimento variando ao longo do tempo.

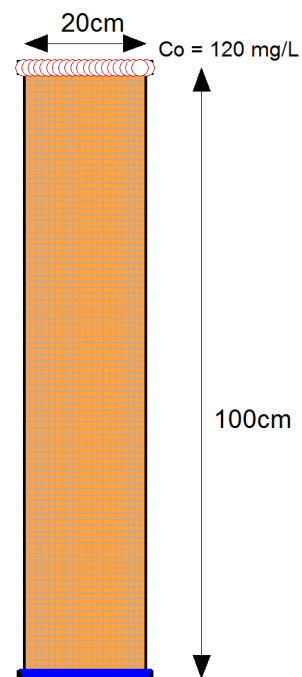
Nas Figuras 5.58 e 5.59 são apresentadas as malhas e condições de contorno das telas iniciais dos aplicativos SEEP/W (simulação do problema de fluxo) e CTRAN/W.

Figura 5.58: Malha utilizada e Condições de Contorno – Simulação Bacia SEEP/W



Fonte: O autor

Figura 5.59: Malha utilizada e Condições de Contorno – Simulação Bacia CTRAN/W



Fonte: O autor

Como o aplicativo SEEP/W possui limitação quanto a variação de propriedades do solo ao longo da simulação, foi necessário dividir a modelagem em quatro etapas, inserindo em cada etapa uma condutividade hidráulica diferente, equivalente à condutividade hidráulica média naquele período.

O k médio de cada período foi definido em função da variação de k com o volume de poros percolado, já que o contato entre o fluido e o solo é o principal motivo da redução de k . Assim, na modelagem da bacia considerando um solo que foi ensaiado com um gradiente menor que o adotado, a redução de k ocorreria em menor tempo que o verificado no ensaio.

Nas simulações das bacias, para cada tipo de solo compactado em cada energia de compactação, foram consideradas as médias de condutividades hidráulicas de todos os corpos de prova. Como o Solo Piçarra apresentou comportamento bastante similar quando foi compactado nas energias Proctor Intermediário e $E = 9 \text{ kgf.cm/cm}^3$, os resultados de todos os corpos de prova foram agrupados.

O aplicativo CTRAN/W, de maneira semelhante, possui a mesma limitação em relação às propriedades do transporte de contaminantes. Assim, foi utilizada uma estratégia similar de modelagem considerando a variação da condutividade hidráulica e do coeficiente de decaimento ao longo do tempo.

É importante destacar que, no caso do aplicativo CTRAN/W, a variável de decaimento não é a variável que foi considerada para a modelagem das curvas de chegada, μ (1/s), e sim o tempo de meia vida, T (s). O tempo de meia vida (T) corresponde ao tempo decorrido quando $C/C_0 = 1/2$.

Considerando que:

$$C = C_0 \cdot e^{-\mu t} \quad (55)$$

Então, para $C/C_0 = 1/2$, tem-se:

$$\frac{C}{C_0} = \frac{1}{2} = e^{-\mu t} \quad (56)$$

Ou seja,

$$\mu = \ln \frac{2}{T} \rightarrow T = \frac{0,693}{\mu} \quad (57)$$

Onde:

T é o tempo de meia vida (T)

6. ANÁLISE DOS RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1. Condutividade Hidráulica Saturada do Solo Piçarra em função da energia de compactação

Os resultados dos ensaios de permeabilidade utilizando permeâmetros rígidos e carga variável, conforme apresentado no tópico 5.1.4.1, são apresentados na Tabela 6.1.

Tabela 6.1: Configuração dos CPs Solo Piçarra da Segunda Bateria de Ensaios e respectivos coeficientes de permeabilidade saturada

CP	Energia de Compactação	w (%)	ρ_d (g/cm ³)	H (cm)	ϕ (cm)	k (cm/s)
3	PN (6,07 kgf.cm/cm ³)	15,95	1,788	10,832	9,870	1,39E-004
4	PN (6,16 kgf.cm/cm ³)	15,91	1,789	10,905	9,872	1,70E-004
2	PI (12,17 kgf.cm/cm ³)	14,56	1,790	12,388	9,952	6,30E-007
I1	PI (12,01 kgf.cm/cm ³)	14,18	1,792	12,712	9,993	9,31E-007
G	PM (24,18 kgf.cm/cm ³)	12,95	1,876	12,188	10,014	1,19E-007

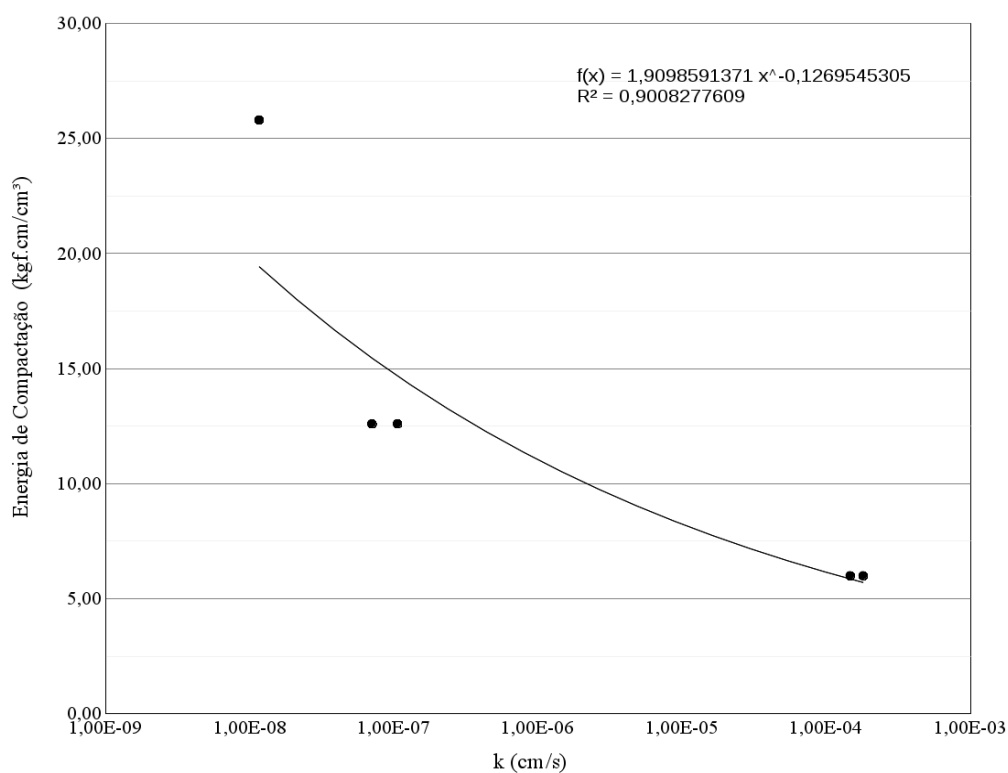
Fonte: O Autor

Onde H = altura do CP, ϕ = diâmetro do CP, w = umidade gravimétrica, ρ_d = massa específica seca

Estes resultados auxiliaram na definição dos valores de energia de compactação que foram empregados na moldagem dos corpos de prova de Solo Piçarra nos ensaios de coluna monitorada. A seguir, a Figura 6.1 apresenta o gráfico da energia de compactação versus o k_{sat} obtido e a respectiva linha de tendência, com $R^2 = 90\%$. A partir destes resultados, foram calculados os valores de energia de compactação para a obtenção dos valores de k desejados (Tabela 6.2). Estes valores de energia foram considerados muito próximos, de forma que para a realização dos ensaios de coluna utilizou-se as energias do Proctor Normal ($E = 5,95$ kgf.cm/cm³), $E = 9$ kgf.cm/cm³ e a energia do Proctor Intermediário ($E = 12,9$ kgf.cm/cm³).

Procurou-se desta forma assegurar que a faixa de variação de valores de permeabilidade pretendida pela PETROBRAS fosse atendida com uma maior segurança.

Figura 6.1: Energia de Compactação x Condutividade hidráulica saturada – Solos Piçarra



Fonte: O autor

Tabela 6.2: Energia de Compactação Calculada para CPs de Solo Piçarra a partir de regressão linear

k (cm/s)	Energia de Compactação
1E-004	(5,01 kgf.cm/cm³)
1E-005	(6,71 kgf.cm/cm³)
1E-006	(8,99 kgf.cm/cm³)

Fonte: O Autor

6.2. Condutividade Hidráulica Saturada dos solos Vermelho e Várzea

Na tabela 6.3 são apresentados os valores de condutividade hidráulica medidos nos ensaios de carga variável para cada corpo de prova dos solos Vermelho e Várzea.

Tabela 6.3: Índices físicos dos CPs dos solos Vermelho e Várzea e respectivos valores de condutividade hidráulica saturada nos experimentos preliminares

Tipo de solo	CP	w (%)	ρ_d (g/cm ³)	h (cm)	ϕ (cm)	k (cm/s)	k inicial médio (cm/s)
Vermelho	1	7,88	2,080	9,558	5,251	5,38E-009	
Vermelho	2	7,87	2,058	9,488	5,277	6,00E-008	3,08E-008
Vermelho	3	7,86	2,067	9,488	5,281	2,50E-008	
Várzea	1	13,64	1,605	10,183	5,241	1,06E-005	
Várzea	2	13,25	1,628	10,132	5,261	7,74E-007	5,55E-006
Várzea	3	13,51	1,618	10,128	5,273	5,29E-006	

Fonte: O Autor

Onde H = altura do CP, ϕ = diâmetro do CP, w = umidade gravimétrica, ρ_d = massa específica seca

Na Tabela 6.4, são apresentados os coeficientes de condutividade hidráulica medidos inicialmente nos ensaios de coluna monitorada e os valores de referência dos ensaios de permeabilidade apresentados anteriormente.

Tabela 6.4: Condutividade Hidráulica medida inicialmente nos ensaios de coluna monitorada x condutividade hidráulica ensaios complementares

Tipo de solo	CP	Ensaio de Coluna Monitorada – k inicial (cm/s)	Média Ensaio de Coluna Monitorada – k inicial (cm/s)	Média Ensaio de Complementares – k (cm/s)
Vermelho	1	9,19E-007		
Vermelho	2	1,30E-007	7,07E-007	3,08E-008
Vermelho	3	2,88E-006		
Várzea	1	9,72E-006		
Várzea	2	6,52E-006	3,97E-006	5,55E-006
Várzea	4	9,88E-007		

Fonte: O Autor

Os valores de condutividade hidráulica medidos nos dois ensaios apresentam ordens de grandeza próximas considerando que condutividade hidráulica é um parâmetro bastante sensível.

6.3. Condutividade Hidráulica em Ensaios de Coluna Monitorada

Conforme relatado, nos Ensaios de Coluna Monitorada foram também determinadas os valores de condutividade hidráulica do solo. Na Tabela 6.5 são apresentadas as condutividades hidráulicas inicial, média e final obtidas dos ensaios e os respectivos índices físicos das amostras:

Tabela 6.5: Condutividades hidráulicas inicial, média e final e respectivos índices físicos

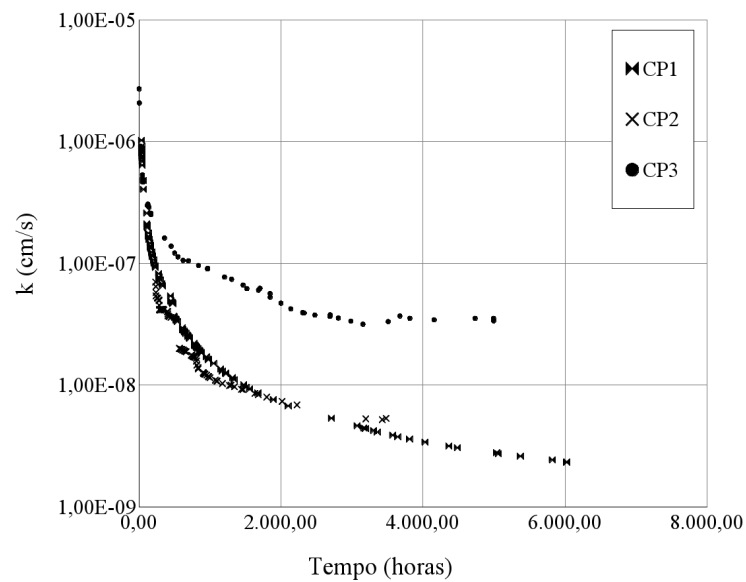
CP	w (%)	ρ_d (g/cm ³)	k inicial (cm/s)	k final (cm/ s)	k médio (cm/s)	Tempo de Ensaio (h)	k inicial / k final
Vermelho - CP1	8,27	2,08	9,19E-07	2,32E-09	3,71E-08	6.020,85	395,27
Vermelho - CP2	11,50	2,03	1,30E-07	5,33E-09	2,58E-08	3.479,34	24,27
Vermelho - CP3	7,87	2,04	2,88E-06	3,32E-08	7,10E-08	4.994,00	86,81
Várzea - CP1	14,81	1,61	9,72E-06	5,46E-07	9,36E-07	5.396,10	17,80
Várzea - CP2	15,07	1,61	6,52E-06	5,40E-07	8,62E-07	5.399,52	12,08
Várzea - CP4	14,10	1,61	1,21E-06	1,45E-07	3,46E-07	5.397,00	8,35
Piçarra - CP1	15,16	1,80	1,54E-04	1,71E-04	1,71E-04	15,00	0,90
Piçarra - CP8	15,87	1,83	1,46E-06	6,20E-09	1,50E-08	1.674,07	236,06
Piçarra - CP9	13,37	1,91	2,92E-06	1,66E-08	4,53E-08	1.416,13	158,49
Piçarra - CP4	13,70	1,89	5,53E-06	4,90E-09	2,31E-08	4.037,50	1130,11
Piçarra - CP5	13,76	1,91	2,19E-07	6,53E-09	1,38E-08	3.769,90	33,53
Piçarra - CP6	13,63	1,87	7,41E-06	9,25E-09	4,13E-08	3.600,92	806,94

Fonte: O Autor

Conforme dados apresentados na Tabela 6.5, houve redução da condutividade hidráulica em todos os ensaios, com exceção do ensaio realizado com o Solo Piçarra CP1. É importante destacar que o curto tempo deste ensaio, em função da alta condutividade hidráulica, deve ser levado em consideração, já que as reações que podem provocar a redução da condutividade hidráulica poderiam ocorrer posteriormente ao tempo do ensaio. Nas figuras

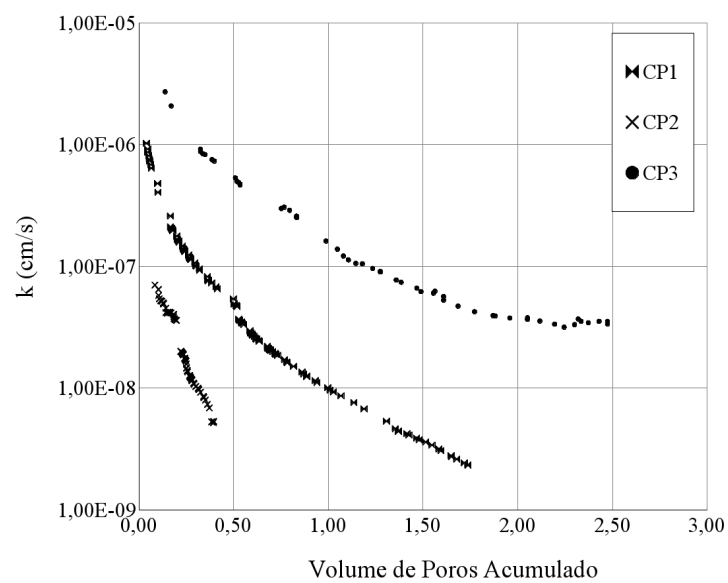
6.2 a 6.9 são apresentadas graficamente as curvas de variação da condutividade hidráulica ao longo do tempo e relacionadas ao volume de poros percolados para cada solo.

Figura 6.2: Variação de k ao longo do tempo – Solo Vermelho



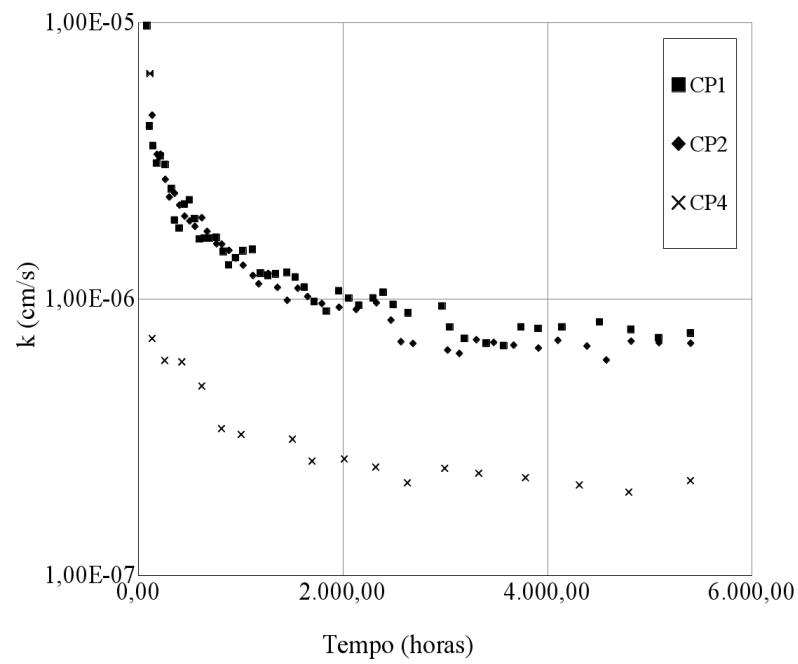
Fonte: O autor

Figura 6.3: Variação de k x volume de poros percolados – Solo Vermelho



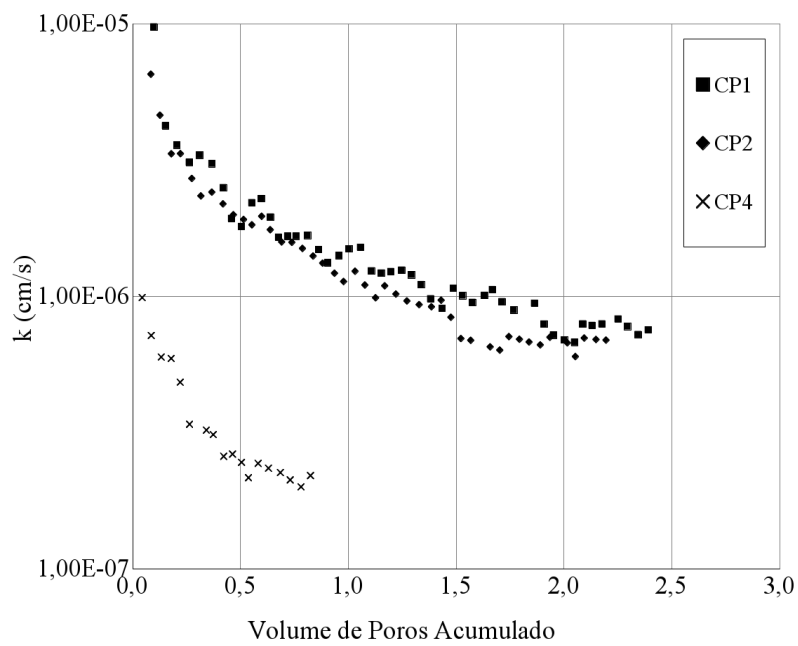
Fonte: O autor

Figura 6.4: Variação de k ao longo do tempo – Solo Várzea



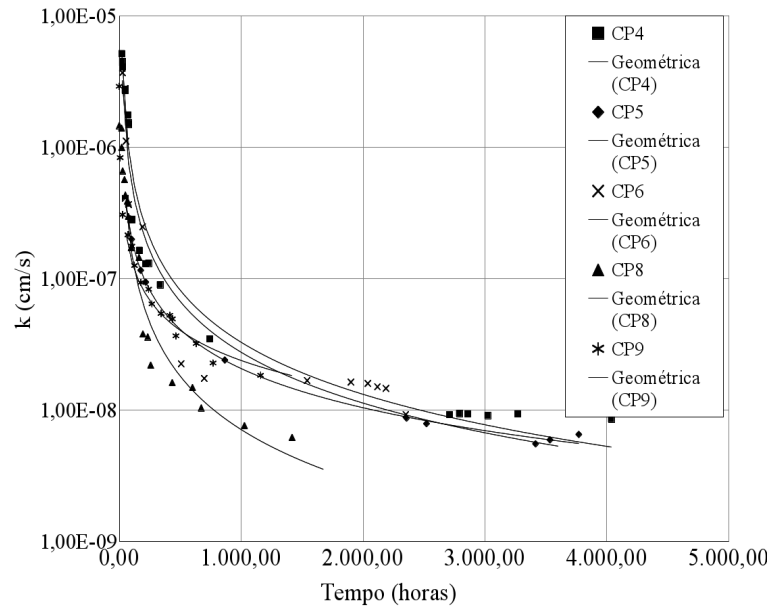
Fonte: O autor

Figura 6.5: Variação de k x volume de poros percolados – Solo Várzea



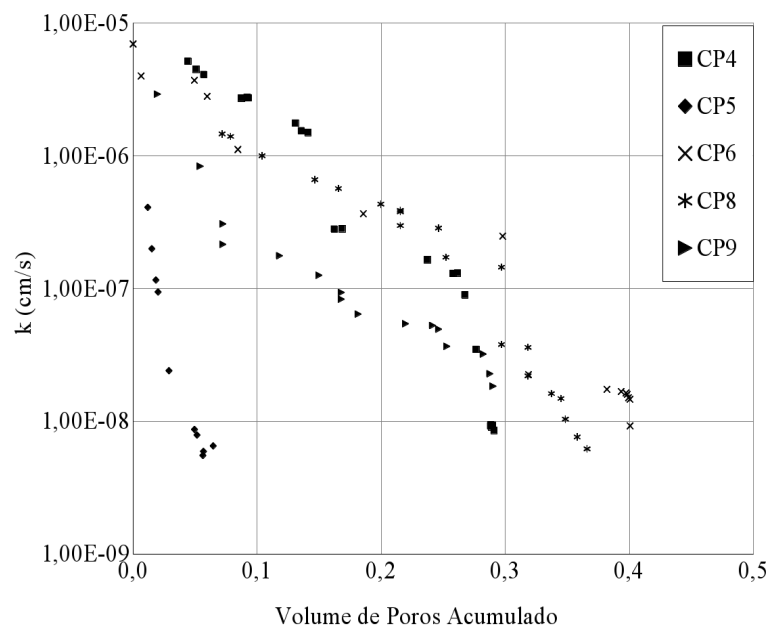
Fonte: O autor

Figura 6.6: Variação de k ao longo do tempo – Solo Piçarra Proctor Intermediário e $E = 9$
 kgf.cm/cm^3



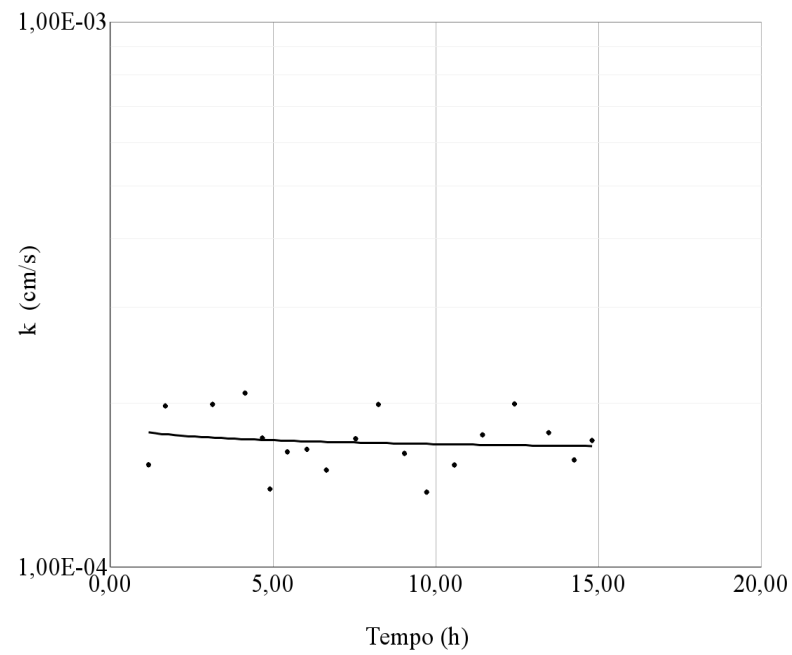
Fonte: O autor

Figura 6.7: Variação de k x volume de poros percolados – Solo Piçarra Proctor Intermediário
e $E = 9 \text{ kgf.cm/cm}^3$



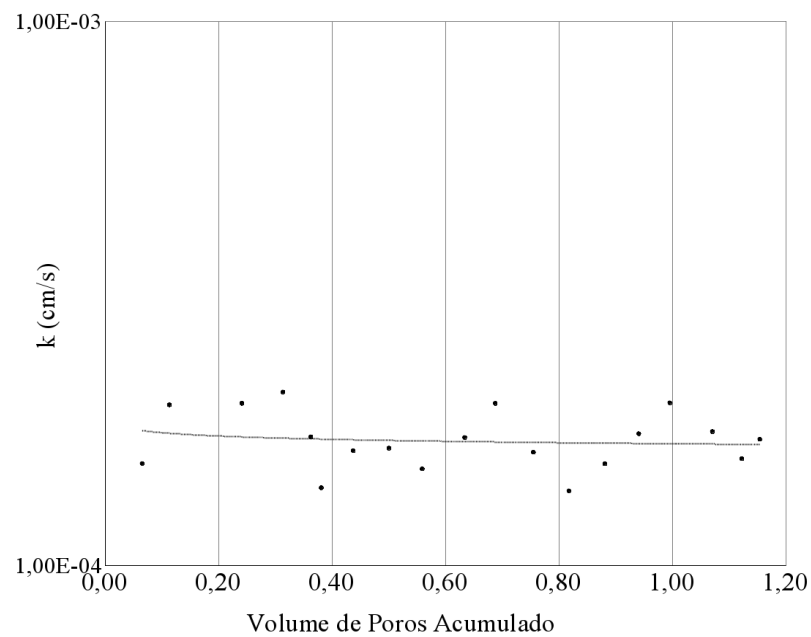
Fonte: O autor

Figura 6.8: Variação de k ao longo do tempo – Solo Piçarra Proctor Normal CP1



Fonte: O autor

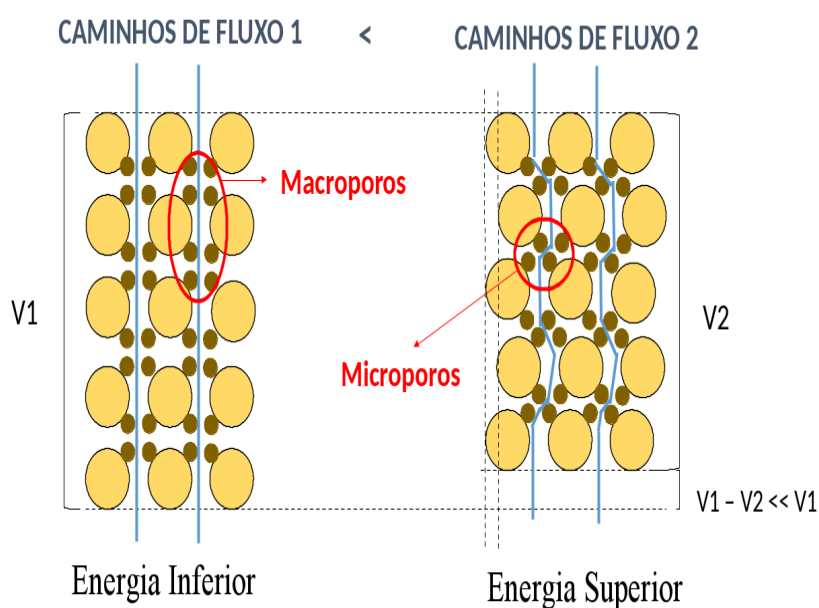
Figura 6.9: Variação de k x volume de poros – Solo Piçarra Proctor Normal CP1



Fonte: O autor

A grande diferença entre os valores de condutividade hidráulica obtidos para o Solo Piçarra compactado na energia Proctor Normal em comparação aos experimentos com este mesmo solo compactado nas energias Proctor Intermediário e $E = 9 \text{ kgf.cm/cm}^3$ pode ser resultado, como citado na revisão bibliográfica, da diminuição do volume e continuidade dos macroporos, com o aumento da energia de compactação. Isto faz com que o fluxo passe a ser governado pelos microporos, diminuindo o k . Este fenômeno pode ser representado pela Figura 6.10.

Figura 6.10: Variação do fluxo no solo com o aumento da energia de compactação



Fonte: O autor

A avaliação das hipóteses causadoras da redução de condutividade hidráulica bem como as razões da ocorrência da sua redução em quase todos os corpos de prova são discutidas na seção 6.7 deste capítulo.

6.4. Curvas de Retenção

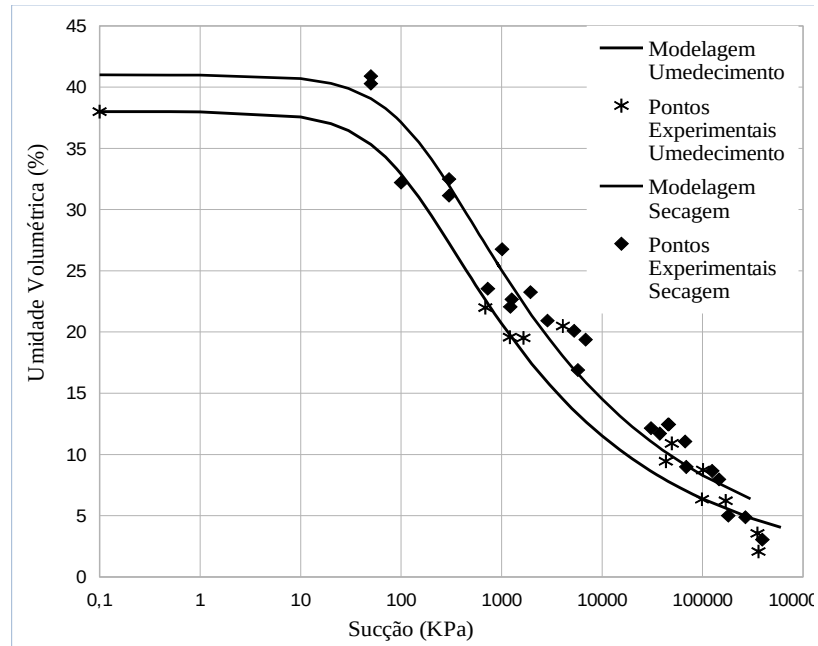
São apresentadas na sequência as curvas de retenção obtidas para os solos estudados. Para os Solos Vermelho e várzea a modelagem da curva de retenção foi realizada utilizando a equação de Van Genuchten (1980). Na modelagem das curvas de retenção do Solo Piçarra nas diversas energias de compactação, as equações de Van Genuchten (1980) não apresentaram um bom ajuste. Assim, foi adotado o modelo de Duplo Van Genuchten (CADUCCI *et al.*, 2010), para solos com distribuição porosimétrica bimodal. As curvas modeladas nesta seção utilizando os modelos de Van Genuchten (1980) e Duplo Van Genuchten serão comparados com os resultados experimentais obtidos no Ensaio de Coluna Monitorada na seção 6.8.2, utilizando as medidas de umidade e de sucção durante a fase de umedecimento. Na tabela 6.6 são apresentados os parâmetros de ajuste da curva de retenção para os solos Vermelho e Várzea, nos ramos de secagem e umedecimento obtidas através dos métodos da câmara de Richards (10-300 kPa) e Método do Psicrômetro (500-300000kPa). Nas figuras 6.11 a 6.12 estão apresentadas as curvas de retenção para os solos Vermelho e Várzea.

Tabela 6.6: Parâmetros da Curva de Retenção pelo Modelo de Van Genuchten (1980)

Solo	Ramo	α	m	n	R ²
Várzea (Proctor Normal)	Secagem	0,007	0,2000	1,2266	0,9595
Vermelho (Proctor Modificado)	Secagem	0,004	0,2100	1,0931	0,9709
Várzea (Proctor Normal)	Umedecimento	0,010	0,2084	1,2633	0,9451
Vermelho (Proctor Modificado)	Umedecimento	0,012	0,1800	1,2195	0,9885

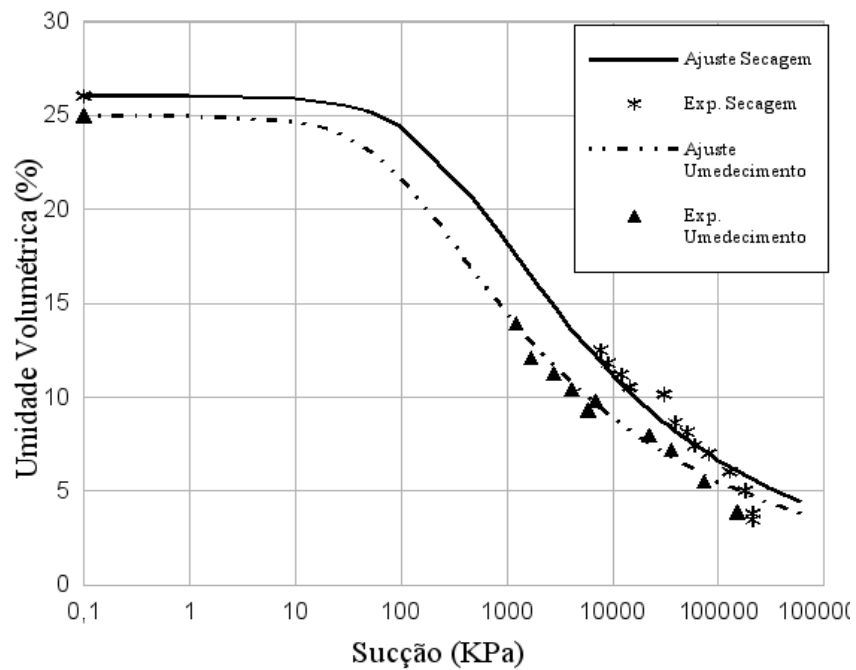
Fonte: O autor

Figura 6.11: Solo Várzea (Proctor Normal) - Curvas de Retenção Modeladas a partir da Equação de Van Genuchten (1980)



Fonte: O autor

Figura 6.12: Solo Vermelho (Proctor Modificado) - Curvas de Retenção Modeladas a partir da Equação de Van Genuchten (1980)



Fonte: O autor

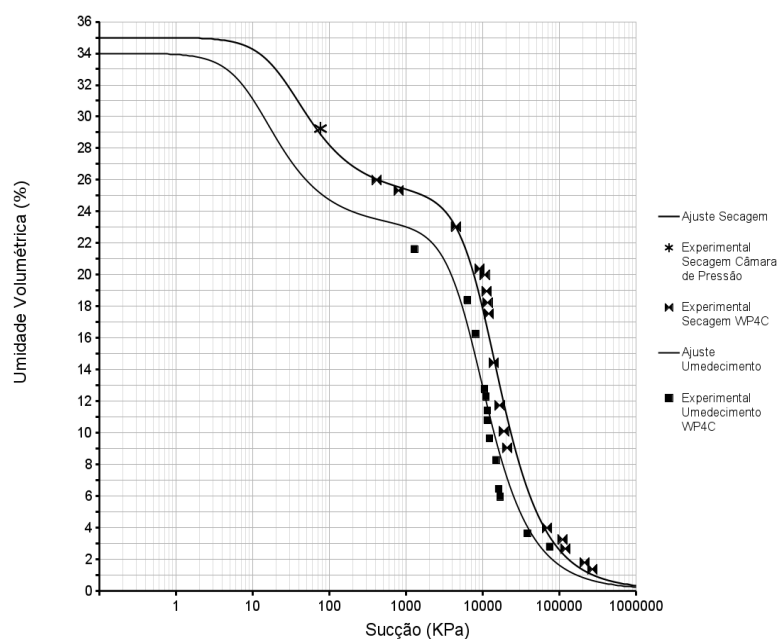
Os parâmetros de ajuste obtidos através da modelagem das curvas de retenção do solo piçarra são apresentados na tabela 6.7 e as curvas estão representadas graficamente na Figura 6.13.

Tabela 6.7: Parâmetros da Curva de Retenção pelo Modelo Duplo Van Genuchten (CADUCCI *et al.*, 2010)

Energia	Ramo	θ_{sat}	α_{est}	m_{est}	n_{est}	θ_{pmp}	a	m	n	R ²
PN	Sec.	0,36	0,04	0,44	1,80	0,25	0,00010	2,00	0,50	0,98
PN	Umed.	0,35	0,11	0,44	1,80	0,23	0,00014	2,25	0,56	0,95
9	Sec.	0,34	0,04	0,44	1,80	0,26	0,00010	2,00	0,50	0,98
9	Umed.	0,33	0,09	0,47	1,90	0,24	0,00015	2,18	0,54	0,98
PI	Sec.	0,32	0,025	0,44	1,80	0,26	0,00010	2,00	0,50	0,98
PI	Umed.	0,31	0,06	0,50	2,00	0,24	0,00015	2,10	0,52	0,95

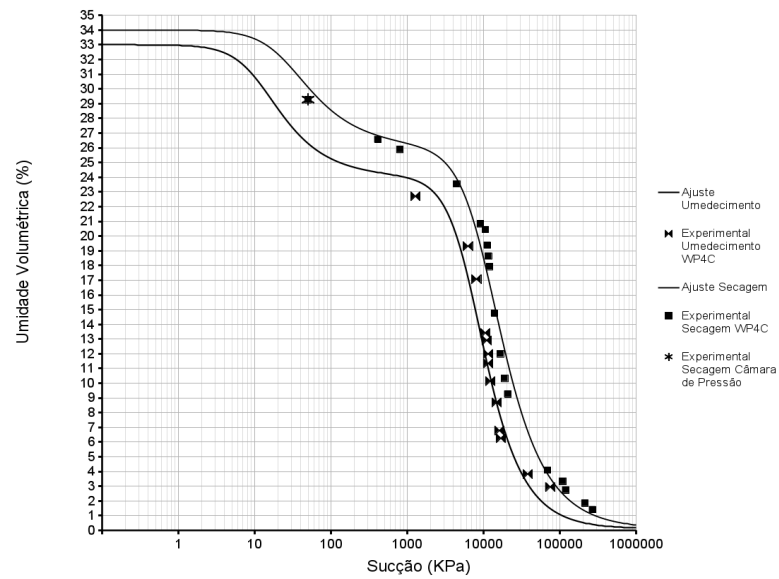
Fonte: O autor

Figura 6.13: Solo Piçarra (PN) - Curvas de Retenção



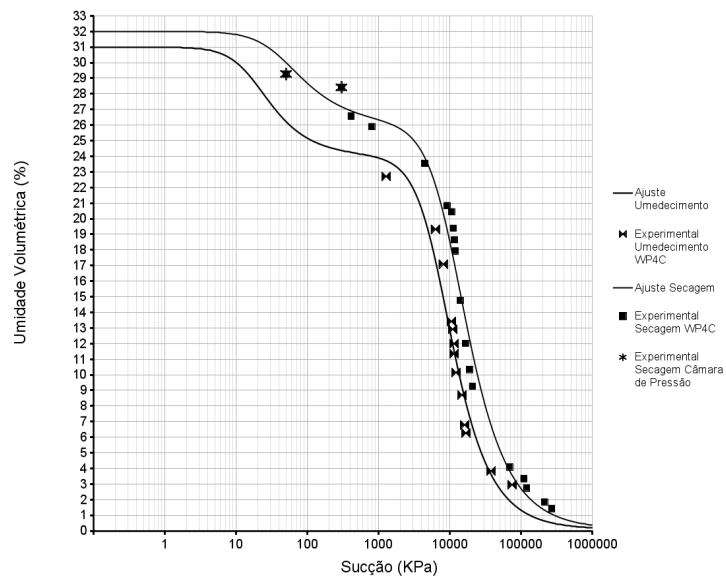
Fonte: O autor

Figura 6.14: Solo Piçarra ($E = 9\text{kgf.cm/cm}^3$) - Curvas de Retenção



Fonte: O autor

Figura 6.15: Solo Piçarra (PI) - Curvas de Retenção



Fonte: O autor

6.5. Curvas de Chegada

As curvas de chegada foram determinadas a partir da análise sequencial da concentração de HTP nos fluidos percolados durante o Ensaio de Coluna Monitorada. Foi utilizada para modelagem da curva de chegada a equação 43 para os ensaios Vermelho CP1, Piçarra CP4 e CP8. porque foi verificada a diminuição da condutividade hidráulica, e conseqüentemente da velocidade do fluxo. Por outro lado, foi proposta a utilização da equação 47 para modelagem da curva de chegada considerando o decaimento biológico variando ao longo do ensaio nos corpos de prova do Solo Várzea (CP1, CP2 e CP3), porque, além da redução de condutividade hidráulica, ocorreram indícios de biodegradação. No ensaio utilizando o corpo de prova com Solo Piçarra compactado na energia Proctor Normal (CP1), não houve a redução da condutividade hidráulica nem a ocorrência de decaimento sendo adotada na modelagem da curva de chegada a equação 29. Nos ensaios utilizando os demais corpos de prova (Solo Vermelho CP2 e CP3; Solo Piçarra CP5, CP6 e CP9), não se obteve amostras suficientes para a modelagem da curva de chegada, por o fluxo através da amostra se tornou virtualmente nulo.

Na tabela 6.8 são apresentados os parâmetros utilizados na modelagem das curvas de chegada apresentadas.

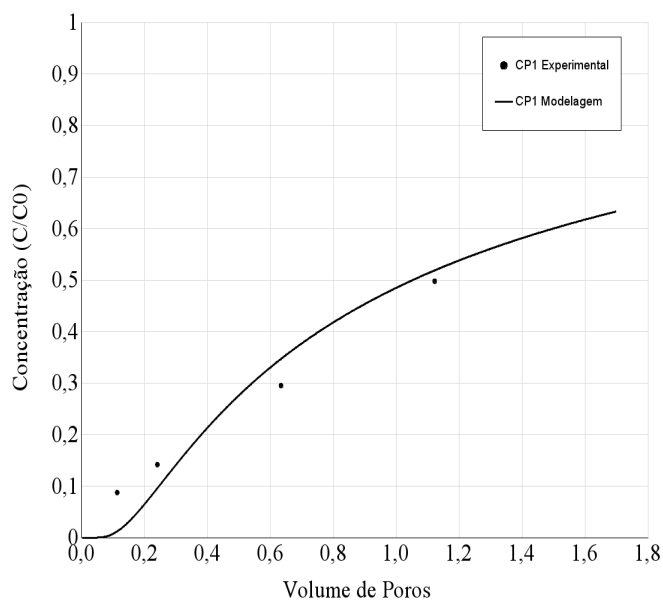
Tabela 6.8: Parâmetros da Modelagem da Curva de Chegada

Solo	C P	Rd	α_s (cm)	V_s Médio (cm/s)	w	D0 (cm ² /s)	μ_{max}	β	t0 (s)	R ²
Vermelho	1	1,0	65	1,62E-06	0,6244	7,00E-06	N/A	N/A	N/A	0,84
Várzea	1	2	110	1,85E-06	0,7451	7,00E-06	1,50E-06	3,00E-07	4,00E+06	0,82
Várzea	2	1,7	50	4,45E-06	0,7451	7,00E-06	9,00E-07	8,00E-07	1,00E+06	0,48
Várzea	4	1,5	60	1,09E-06	0,7451	7,00E-06	5,00E-07	3,00E-07	5,00E+06	0,92
Piçarra	1	1,0	40	4,88E-04	0,7100	7,00E-06	N/A	N/A	N/A	0,85
Piçarra	4	1,0	130	7,79E-06	0,6866	7,00E-06	N/A	N/A	N/A	0,84
Piçarra	8	1,0	130	1,67E-05	0,7000	7,00E-06	N/A	N/A	N/A	0,74

Fonte: O autor

A curva modelada para o solo Piçarra CP1, energia Proctor Normal, definida a partir de ajustes da equação 29 bem como os pontos experimentais estão apresentados na Figura 6.16.

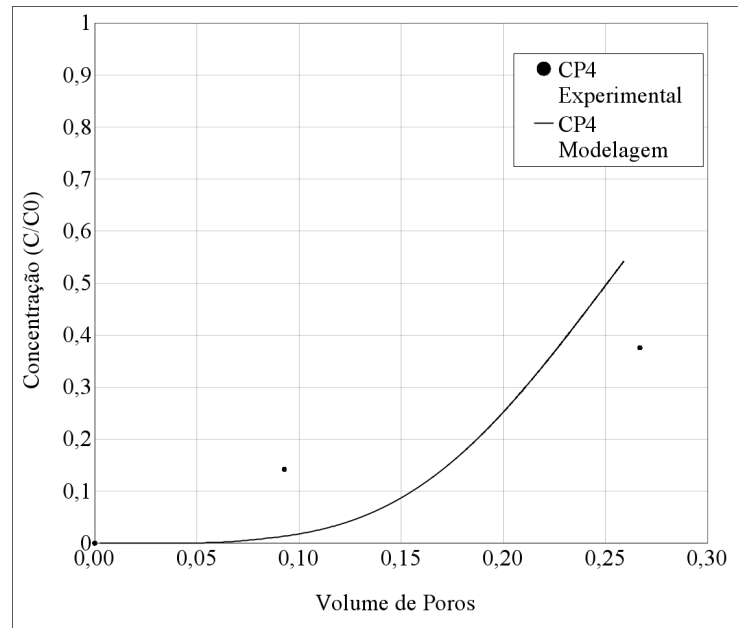
Figura 6.16: Curvas de Chegada C/C_0 x Volume de Poros– Solo Piçarra CP1



Fonte: O autor

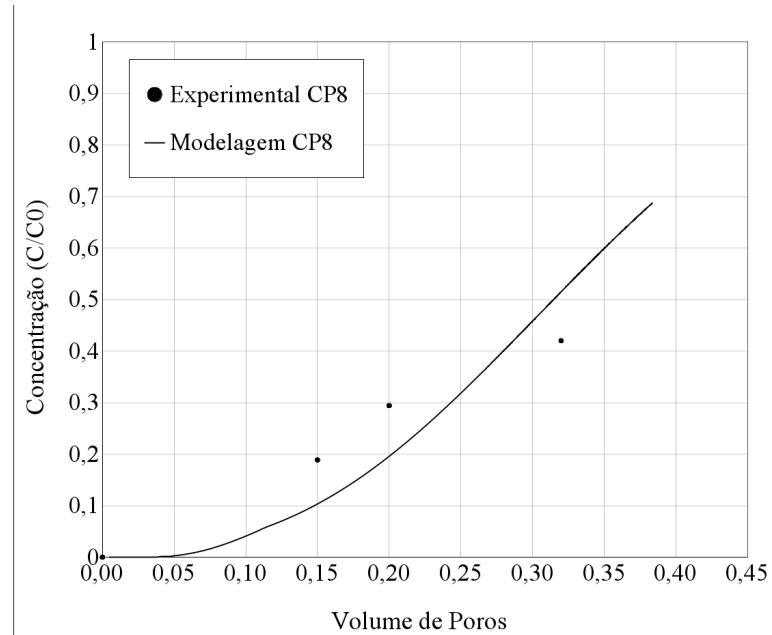
As Figuras 6.17 a 6.19 apresentam as curvas de chegada modeladas para os ensaios com redução de condutividade hidráulica sem decaimento: solo piçarra energias Proctor Intermediário CP4 e $E = 9 \text{ kgf.cm/cm}^3$ (CP8) e solo vermelho (CP1).

Figura 6.17: Curvas de Chegada C/C_0 x Volume de Poros– Solo Piçarra CP4



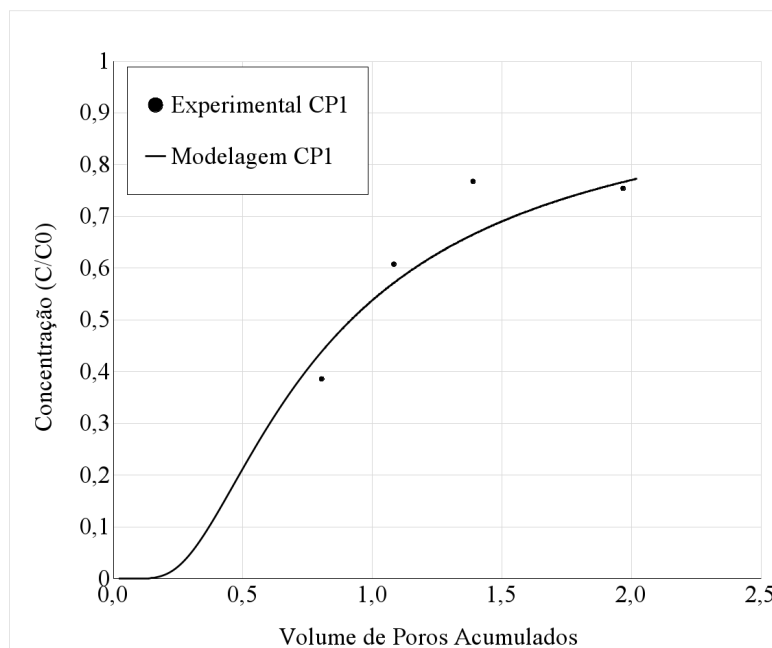
Fonte: O autor

Figura 6.18: Curvas de Chegada C/C_0 x Volume de Poros– Solo Piçarra CP8



Fonte: O autor

Figura 6.19: Curvas de Chegada C/C_0 x Volume de Poros– Solo Vermelho CP1



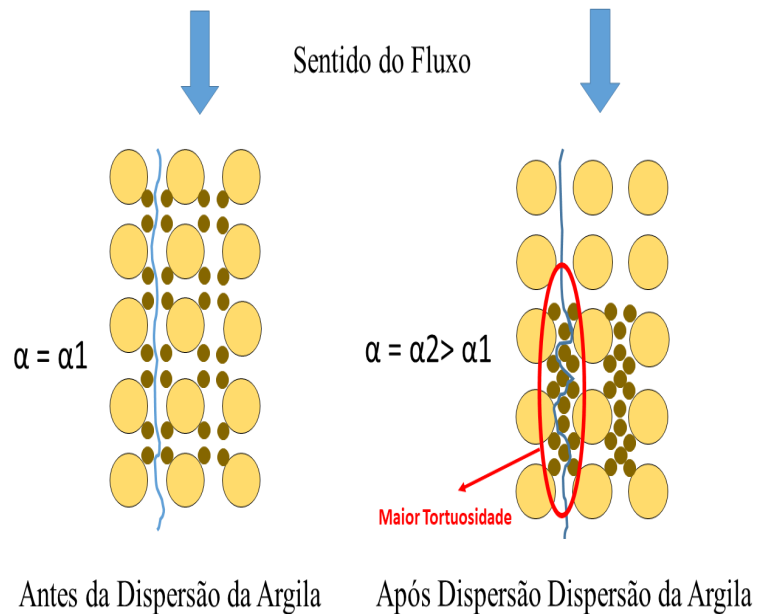
Fonte: O autor

Nas Figuras 6.17 e 6.18 nota-se que o volume de poros percolados quando a concentração relativa (C/C_0) é igual a 0,5 é menor do que um, o que não teria um sentido físico coerente, levando em consideração o conceito de Fator Retardamento (R_d) e Coeficiente de Distribuição (K_d) e o método de determinação gráfico (FREEZE e CHERRY, 1979, apud SHACKELFORD, 1994). Conforme será apresentado na seção 6.7 deste capítulo, há fortes indícios que, nestas ocasiões, a estrutura do solo compactado esteja sendo modificada ao longo do ensaio, assim, tal incompatibilidade pode ser fruto da variação da estrutura do meio poroso que implicou na mudança da condutividade hidráulica saturada durante a percolação.

Na modelagem dos ensaios que apresentaram redução de velocidade ao longo do tempo, a variação da Dispersão Hidrodinâmica (D_h) em função da velocidade medida não gerou bons resultados. Assim, para estes ensaios, se considerou o valor de D_h constante, estabelecido em função da velocidade média do ensaio. Fisicamente, considerar que o valor de D_h se mantém constante durante a percolação sugere que a perda da dispersão causada pela redução da velocidade seria compensada com o aumento da tortuosidade do meio devido à mudança na estrutura do solo. Para estes ensaios, o valor do coeficiente de dispersividade (α_s) calculado seria o valor médio deste ao longo da percolação.

A Figura 6.20 ilustra o fenômeno do aumento da tortuosidade do meio poroso devido à dispersão da argila presente no solo.

Figura 6.20: Aumento da tortuosidade gerado por dispersão da argila



Fonte: O autor

Conforme informado anteriormente, devido à dificuldade de modelar a curva para os experimentos onde houve indícios de degradação biológica (Solo Várzea CP1, CP2 e CP4), foi proposta a variação do coeficiente de decaimento ao longo do tempo, aplicado à equação 47. A variação do coeficiente de decaimento proposta, segue a tendência de uma curva logística, dada pela equação 58.

$$\mu = \frac{\mu_{max}}{1 + e^{-\beta \cdot (t - t_1)}} \quad (58)$$

Onde:

β = constante relacionada à velocidade do crescimento de μ

t_1 = tempo o qual o módulo de μ é igual a 0,5 de μ_{max}

Para que o modelo seja mais aplicável à realidade foi proposta a variável t_0 , que se relaciona com t_1 de acordo com a equação 59:

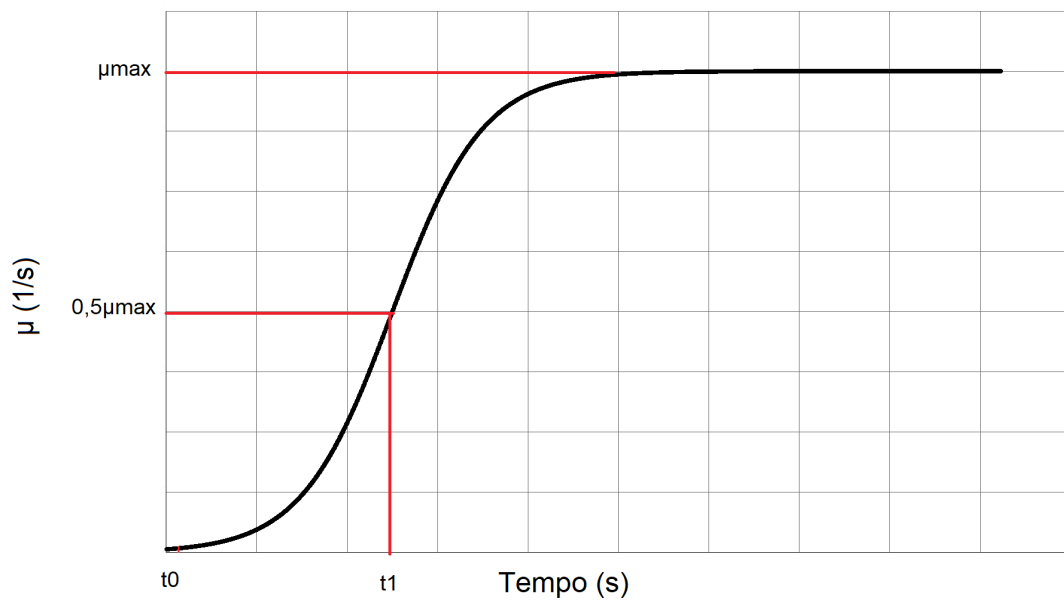
$$t_1 = t_0 \cdot \beta - \frac{\log\left(\frac{\mu_{max}/1000}{\mu_{max} - \mu_{max}/1000}\right)}{\beta} \quad (59)$$

Onde:

t_0 é o tempo para o qual o módulo de μ é igual a $0,001\mu_{max}$, e indicaria o tempo para o início da biodegradação.

A Figura 6.21 apresenta a curva de variação do coeficiente de decaimento ao longo do tempo, destacando as variáveis t_0 , t_1 e μ_{max} .

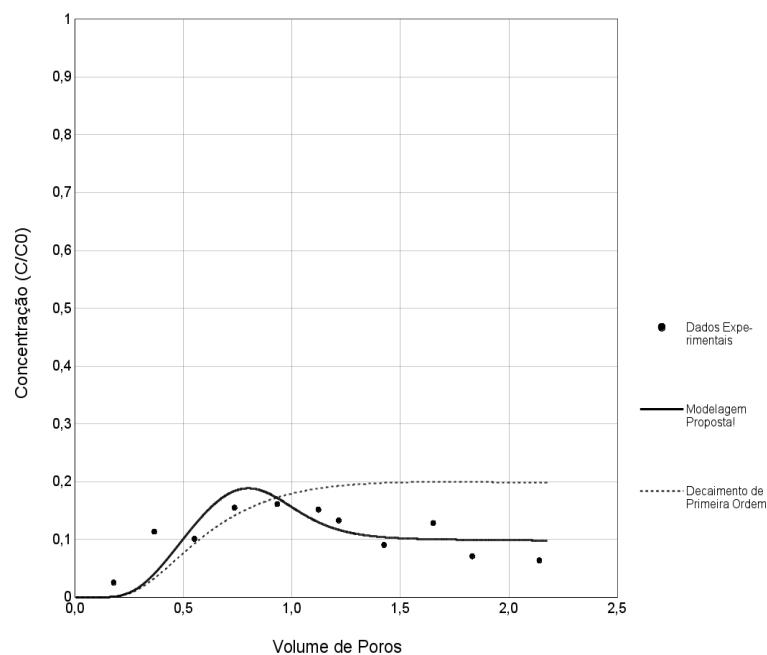
Figura 6.21: Curva de Variação do Coeficiente de Decaimento



Fonte: O autor

Observando a Figura 6.22, é possível perceber diferença entre a forma da curva de chegada considerando o decaimento de primeira ordem com μ igual a $0,5\mu_{max}$ (média de μ) e a forma da curva de chegada considerando a variação logística proposta.

Figura 6.22: Curvas de Chegada C/C_0 x Volume de Poros para $\mu = 0,5\mu_{\max}$ (média de μ na curva logística) e μ variando com a curva logística

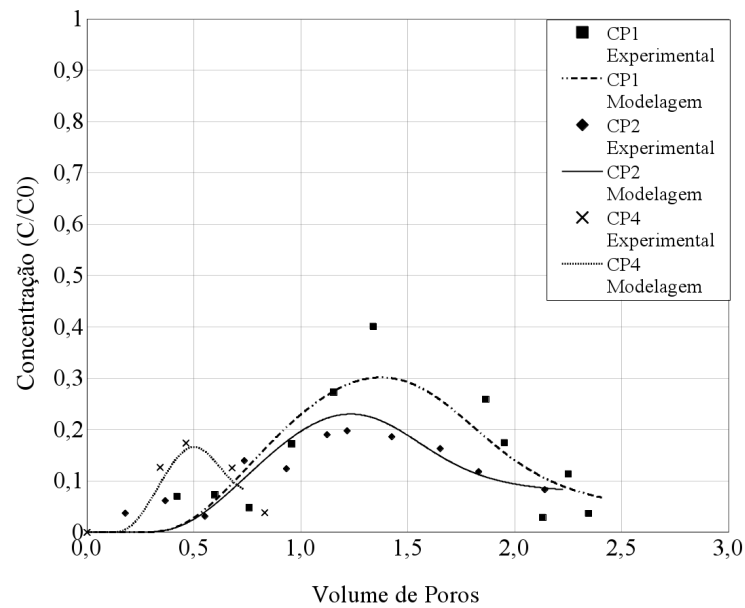


Fonte: O autor

Ao considerar um tempo t_0 , tempo mínimo para que a degradação biológica se inicie, este modelo sugere que as colônias de bactérias e fungos necessitam para aumentar de população simultaneamente de: uma quantidade mínima de nutrientes e um tempo mínimo de contato com estes nutrientes. Após o valor de μ se igualar a μ_{\max} , final da curva logística e quando supostamente as colônias chegam à população máxima, o comportamento do decaimento seria igual ao do decaimento de primeira ordem, ou seja, a cinética de biodegradação seria diretamente proporcional à quantidade de nutrientes disponíveis.

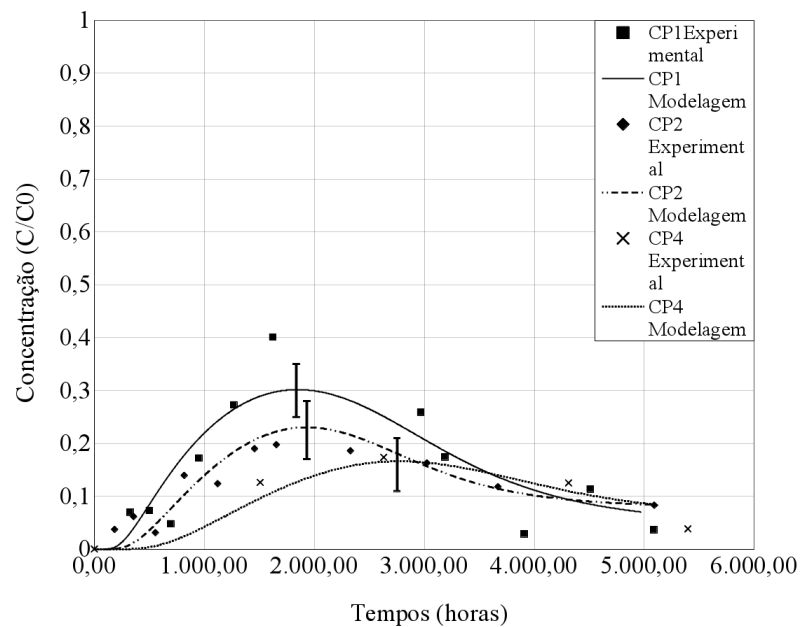
As curvas de chegada determinadas a partir do modelo proposto estão apresentadas para o solo várzea na Figura 6.23 em função do volume de poros percolados. Na Figura 6.24, estão apresentadas as curvas de chegada em função do tempo destacando o pico de cada curva.

Figura 6.23: Curvas de Chegada C/C_0 x Volume de Poros– Solo Várzea CP1, CP2 e CP4



Fonte: O autor

Figura 6.24: Curvas de Chegada C/C_0 x Tempo– Solo Várzea CP1, CP2 e CP4



Fonte: O autor

6.6. Atividade microbiana

Como foi verificada a ocorrência de decaimento nos valores de concentração de HTP nos ensaios de coluna monitorada utilizando o solo várzea, foram realizados ensaios de determinação populacional de microorganismos para validar a hipótese de que haveria atividade microbiana resultando na degradação do HTP.

Os ensaios foram executados no Instituto de Ciências da Saúde da Universidade Federal da Bahia a partir de amostras de solo e do fluido percolado do CP2 do solo várzea através da inoculação do material em meio mineral acrescido de petróleo em condições de aerobiose e anaerobiose.

Segundo os resultados obtidos, os microrganismos anaeróbios degradadores de petróleo foram 18 vezes mais abundantes do que os aeróbios. Como não foram detectadas bactérias aeróbias no percolado é possível que são os microrganismos anaeróbios os mais ativos no sistema e, por isso, produzem mais biomassa dentro da coluna que é então carregada pelo percolado. Dessa forma, pode-se também sugerir que os microrganismos aeróbios detectados no solo sejam, possivelmente, anaeróbios facultativos. Estes resultados estão de acordo também com as condições de realização dos ensaios de coluna.

6.7. Avaliação de Hipóteses para Diminuição da Condutividade nos Ensaios de Coluna

6.7.1. Verificação Da Hipótese De Obstrução Dos Poros Por Dispersão Da Argila

Conforme relatado anteriormente, de forma a melhor avaliar a hipótese de obstrução dos poros por dispersão da argila, foram determinadas as concentrações dos cátions, o pH, a CE e o SAR na fonte e no efluente ao longo do tempo de ensaio, assim como a composição atômica do solo por FRX antes e após o ensaio e determinada a composição mineralógica de cada solo através do ensaio DRX. Como o ensaio com o solo vermelho disponibilizou poucas amostras de efluente, não foi possível obter resultados a respeito da concentração de cátions nos fluidos percolados deste solo.

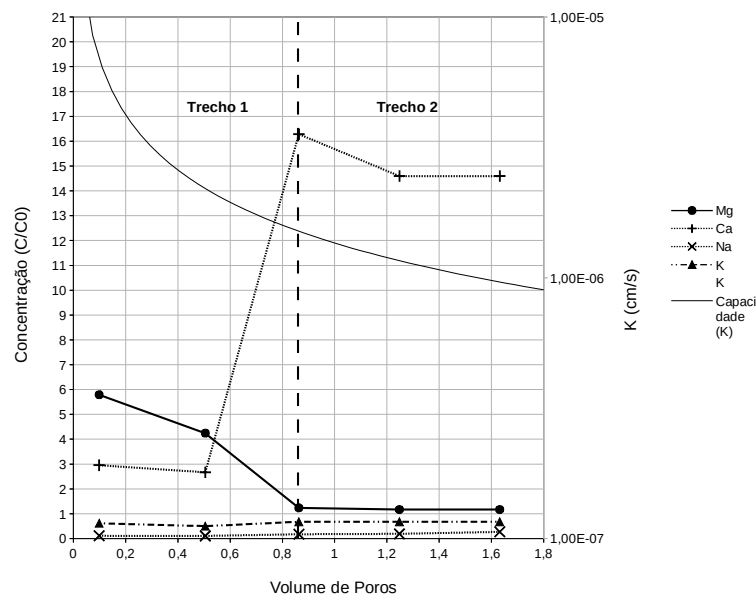
De acordo com diversos autores (FOSTER, 1955; AZARI E LEIMKUHNER, 1990; CURTIN *et al.*, 1994), um forte indício de que estaria ocorrendo a dispersão da argila seria a liberação de cátions bivalentes (Ca e Mg) os quais estariam sendo substituídos pelos cátions monovalente (Na, principalmente). Para avaliar a influência deste fenômeno na redução da condutividade hidráulica dos ensaios, foram traçados gráficos que relacionam a Concentração dos Cátions (C/C_0) e a condutividade hidráulica com o volume de poros percolado.

Para a análise dos ensaios utilizando o solo várzea, os gráficos foram divididos em dois trechos. A abscissa de separação destes coincide com a abscissa do ponto onde houve maior variação na concentração do cálcio (Ca), cátion que apresenta maior concentração na fonte em relação ao magnésio (Mg). Nas Figuras 6.25 a 6.27 são apresentadas as variações da concentração dos cátions e as variações do coeficiente de condutividade hidráulica ao longo da percolação dos corpos de prova de solo várzea.

Como é possível visualizar nos três gráficos, o trecho 1 é aquele que apresenta maior redução na condutividade hidráulica, sendo esta relacionada com as variações nas concentrações de saída do Mg e do Ca. Analisando as Figuras 6.25 a 6.27 se verifica a expulsão do cálcio e do magnésio (valores de $C/C_0 > 1$) e a absorção (valores de $C/C_0 < 1$) do sódio e do potássio durante a percolação. Nas primeiras coletas, o cátion com maior concentração relativa é o Magnésio, indicando que este é o primeiro cátion a ser intercambiado e expulso da zona interlamelar. Com o passar do tempo, a concentração de magnésio reduz e aumenta substancialmente a concentração de cálcio, indicando o intercâmbio mais tardio deste elemento. A concentração relativa de sódio (Na) apresenta leve

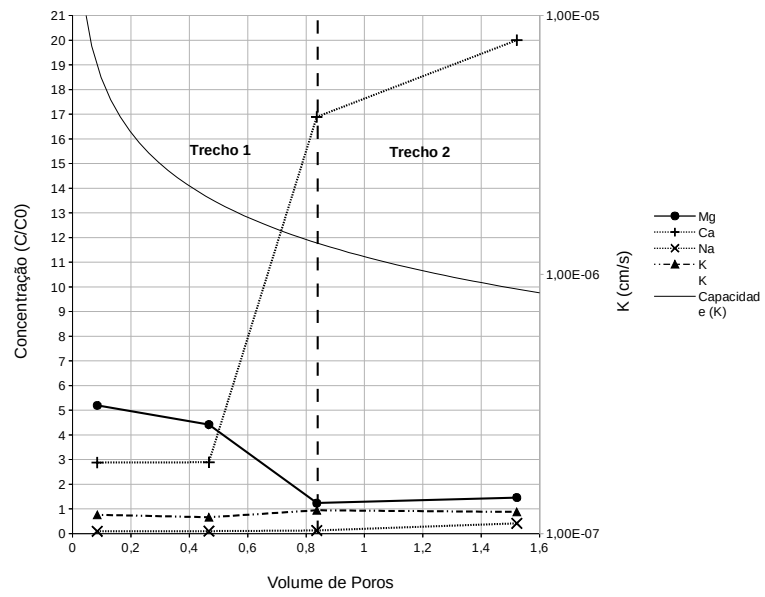
acrécimo durante o ensaio, porém, permanece baixa ($C/C_0 < 0,20$) durante todo o trecho 1, o que indica que este cátions está sendo absorvido pelo solo e provavelmente ocupando o espaço dos cátions bivalentes. O potássio foi o único cátion que não apresentou comportamento similar em todos os ensaios: enquanto nos ensaios de coluna do CP1 e CP2, foi percebida a absorção deste cátion, no ensaio CP4, se verificou a expulsão do mesmo.

Figura 6.25: Variação de k e Conc. dos Cátions x Volume de poros – Solo Várzea CP1



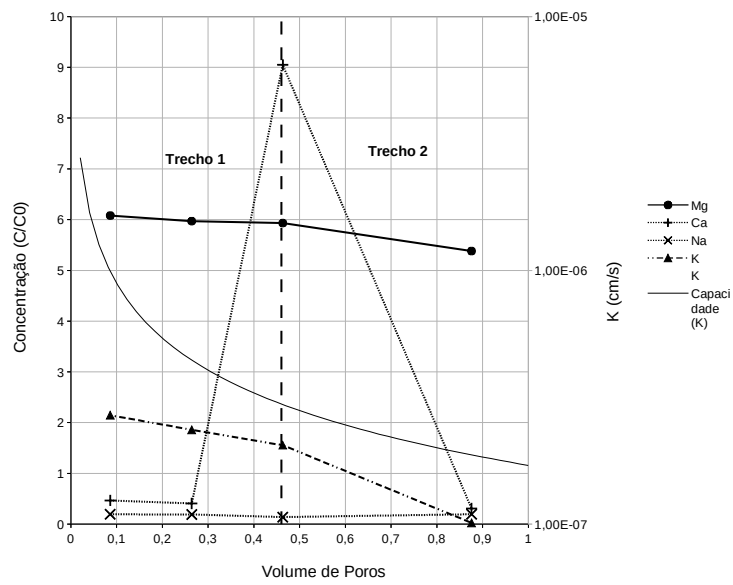
Fonte: O autor

Figura 6.26: Variação de k e Conc. dos Cátions x Volume de poros – Solo Várzea CP2



Fonte: O autor

Figura 6.27: Variação de k e Concentração dos Cátions x Volume de poros – Solo Várzea CP4

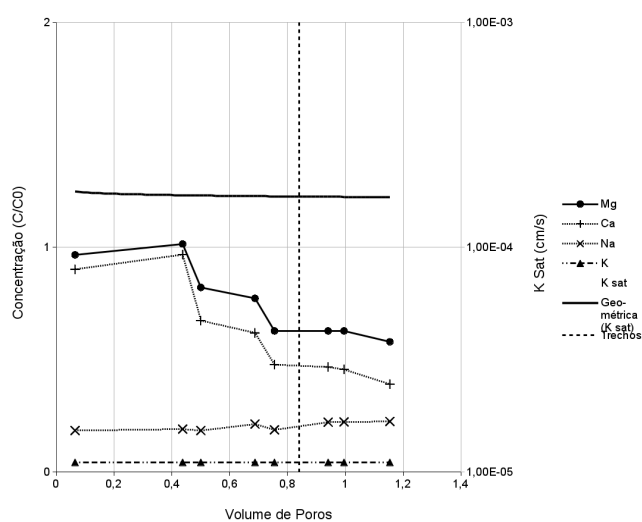


Fonte: O autor

Para os corpos de prova de solo piçarra também foram determinadas as concentrações dos cátions. Para o CP1, único ensaio que não apresentou redução de condutividade hidráulica, não se identificou nenhum dos cátions com concentração maior que a fonte em todo o ensaio (Figura 6.28). A manutenção da condutividade hidráulica constante durante o ensaio e a não ocorrência de liberação de cátions bivalentes podem sugerir que a redução da condutividade hidráulica no solo piçarra esteja vinculada ao fenômeno de dispersão da argila, o qual não estaria ocorrendo. De acordo ainda com o que foi apresentado na seção 6.3, a preferência do fluxo pelos macroporos no caso do piçarra CP1 reduz o contato do fluido com a argila presente na matriz do solo enquanto nos casos onde o fluxo é governado pelos microporos o contato é intenso, implicando na dispersão da argila.

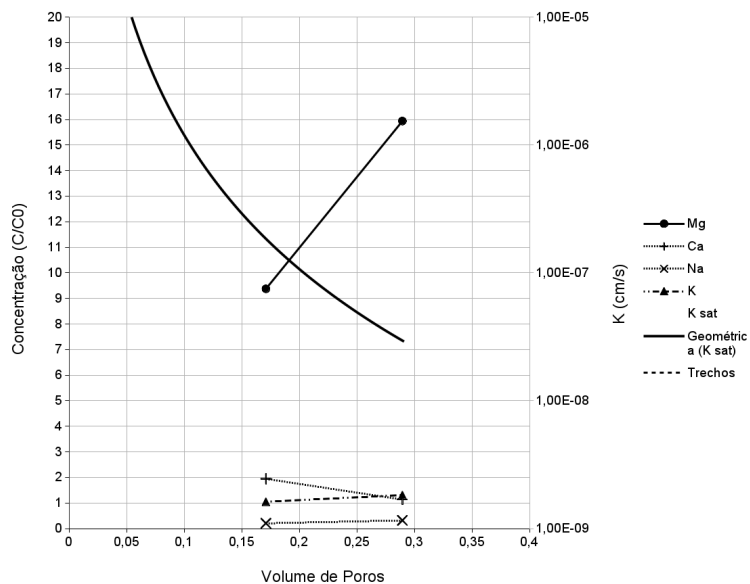
Diferente do que ocorreu no CP1 do solo piçarra (Energia Proctor Normal), os corpos de prova compactados nas energias Proctor Intermediário e E = 9 kgf.cm/cm³ apresentaram grande redução na condutividade hidráulica. Para estes corpos de prova, o volume coletado foi reduzido, inviabilizando a verificação do pico da concentração de cálcio ou magnésio para determinar os trechos 1 e 2. Ainda assim, é possível visualizar que ocorre a expulsão do Cálcio e do Magnésio em todos os ensaios. Nas Figuras 6.29 a 6.33 são apresentadas as concentração dos cátions e as variações do coeficiente de condutividade hidráulica ao longo da percolação destes corpos de prova.

Figura 6.28: Variação de k e Concentração Cátions x Volume de poros – Solo Piçarra CP1



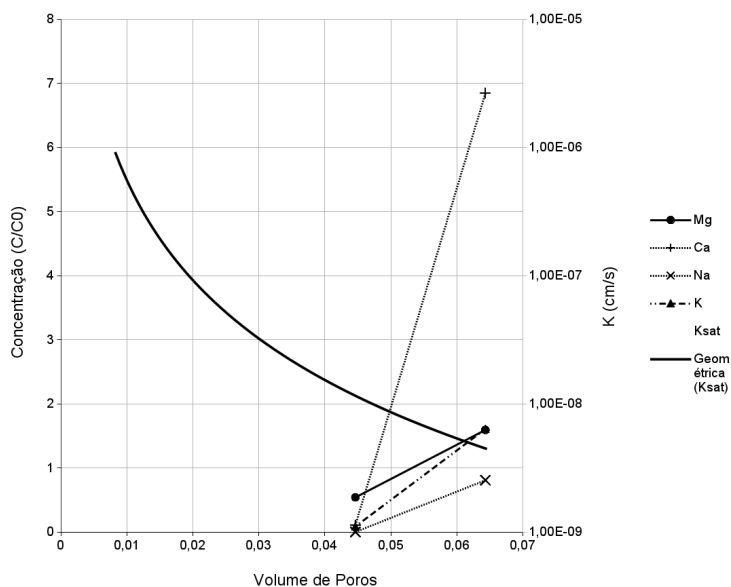
Fonte: O autor

Figura 6.29: Variação de k e Concentração dos Cátions x Volume de poros – Solo Piçarra CP4



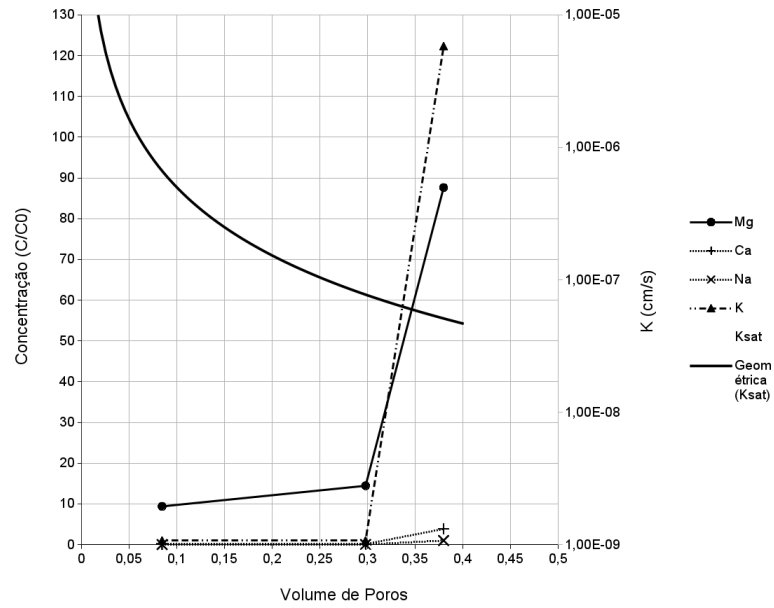
Fonte: O autor

Figura 6.30: Variação de k e Concentração dos Cátions x Volume de poros – Solo Piçarra CP5



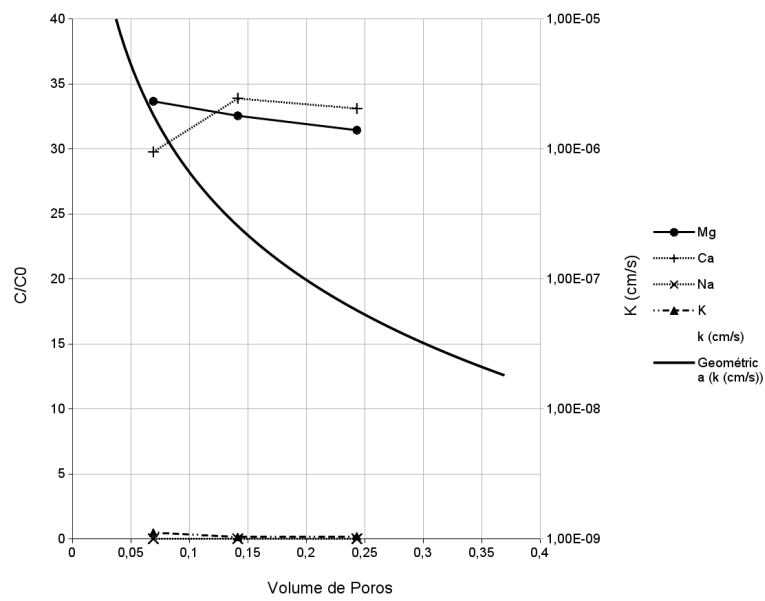
Fonte: O autor

Figura 6.31: Variação de k e Concentração dos Cátions x Volume de poros – Solo Piçarra CP6



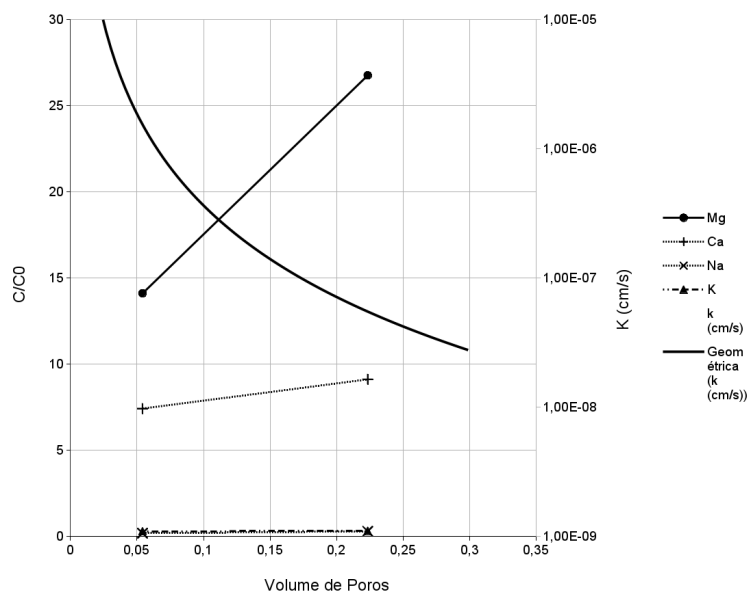
Fonte: O autor

Figura 6.32: Variação de k e Concentração dos Cátions x Volume de poros – Solo Piçarra CP8



Fonte: O autor

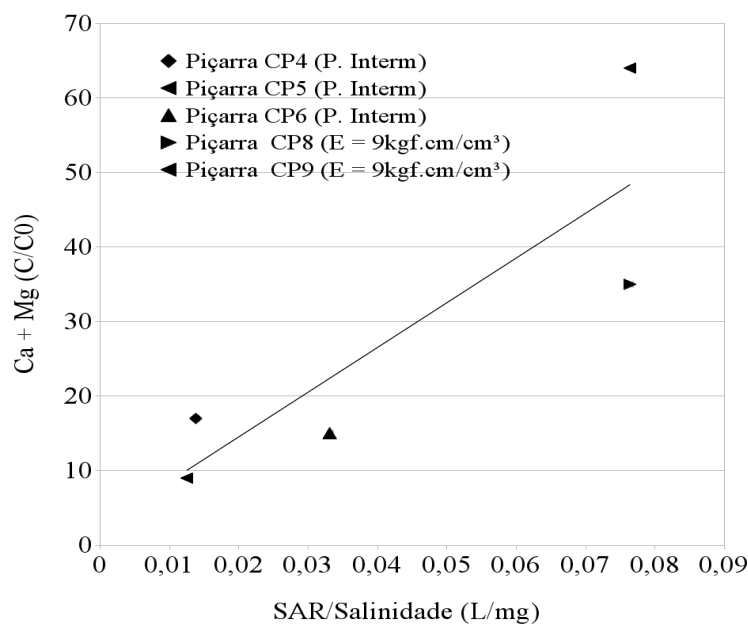
Figura 6.33: Variação de k e Concentração dos Cátions x Volume de poros – Solo Piçarra CP9



Fonte: O autor

Comparando a soma das concentrações relativas (C/C_0) dos cátions cálcio (Ca) e magnésio (Mg) quando o volume de poros percolados é igual a aproximadamente 0,2 com a razão entre a Relação de Adsorção de Sódio (SAR) e a salinidade do fluido de entrada (solo piçarra, 9 kgf.cm/cm^3 e Proctor Intermediário), é possível verificar uma tendência clara, conforme está apresentado no gráfico da Figura 6.34. O valor aproximado de 0,2 volume de poros foi escolhido por ser uma medida comum a praticamente todos os ensaios.

Figura 6.34: Gráfico Soma da Concentração Relativa (C/C_0) de Cálcio e Magnésio x Razão entre SAR e Salinidade



Fonte: O autor

Comparando os dados apresentados nas curvas de variação de k e C/C_0 dos cátions para os solos várzea e piçarra (Proctor Intermediário e $E = 9 \text{ kgf.cm/cm}^3$), é possível verificar que, ainda os valores iniciais de k sejam semelhantes, o comportamento ao longo da percolação é distinto. Para o solo várzea ocorre uma redução de permeabilidade mais amena, variando de aproximadamente 8 a 18 vezes. A soma das concentrações relativas (C/C_0) de Ca e Mg quando volume de poros é igual a 0,2 é de aproximadamente 8. Por outro lado, para o solo piçarra a redução de k é mais acentuada, variando de aproximadamente 33 a 1130 vezes enquanto que a soma das concentrações relativas de Ca e Mg varia de 9 a 65.

Além disto, baseado nos resultados do ensaio DRX, é perceptível que a concentração de argilominerais no solo piçarra (Caulinita, 28,14%; Dickita, 22,70%; e Nacrita, 12,41%) é maior que no solo várzea (Caulinita, 14,21%). Assim, este solo estaria mais propício à obstrução dos poros por dispersão da argila. Na Tabela 6.9 são apresentados os valores dos parâmetros supracitados para cada CP.

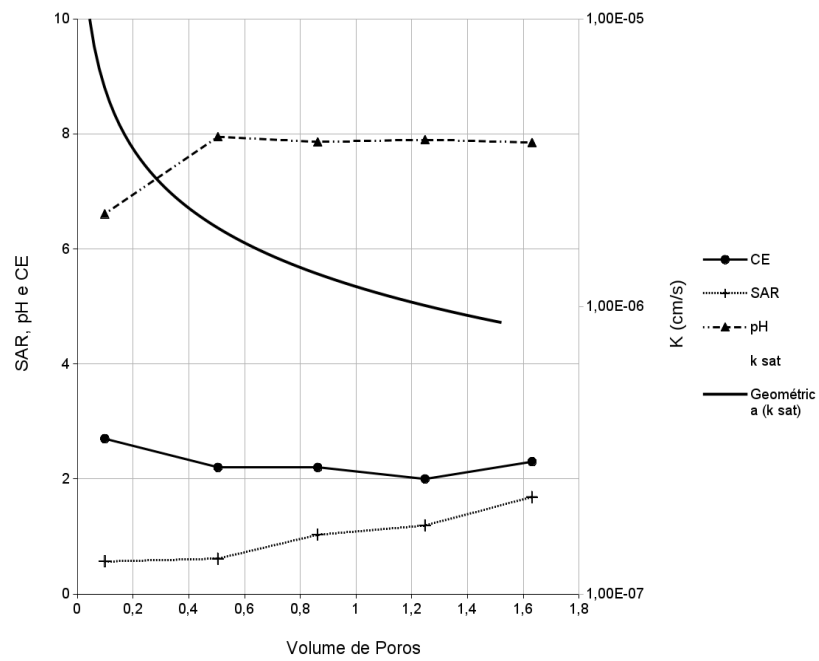
Tabela 6.9: Cátions bivalentes liberados, SAR e Salinidade

CP	Mg + Ca (C/C ₀)	SAR	Salinidade (ml/L)	SAR / Salinidade	k inicial / k final
Várzea - CP1	8,07	11,52	1320	0,009	17,80
Várzea - CP2	8,74	11,52	1320	0,009	12,08
Várzea - CP4	6,38	11,52	1320	0,009	8,35
Piçarra - CP8	64,56	79,47	1040	0,076	236,06
Piçarra - CP9	35,88	79,47	1040	0,076	158,49
Piçarra - CP4	11,32	21,39	1550	0,013	1130,11
Piçarra - CP5	8,44	70,96	5680	0,012	33,53
Piçarra - CP6	14,56	41,71	1260	0,033	806,94

Fonte: O Autor

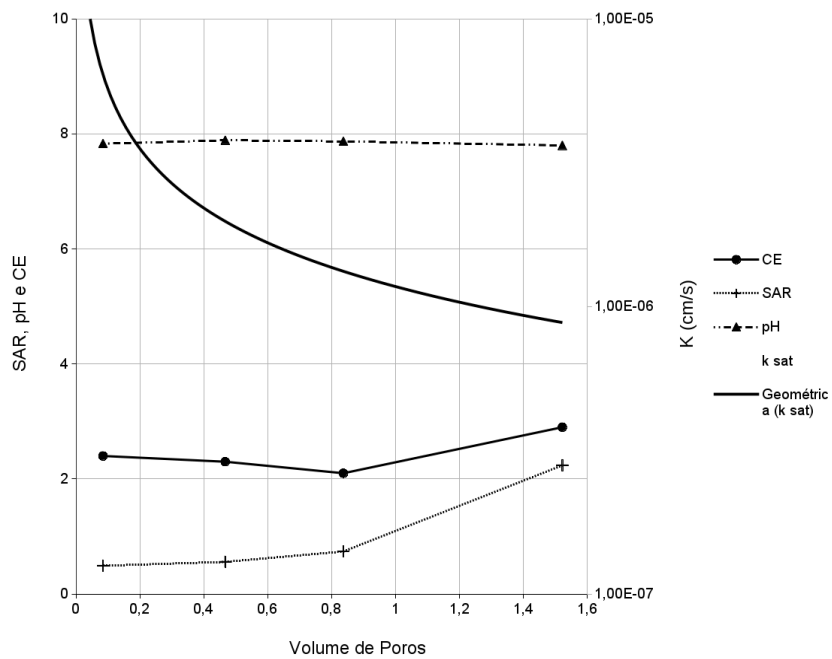
As figuras 6.35 a 6.37 apresentam a variação no Ph, condutividade elétrica e Relação de Adsorção de Sódio (SAR) do fluido percolado durante o ensaio. O aumento da concentração do sódio e diminuição da concentração dos cátions bivalentes provoca o aumento do SAR no fluido percolado. Conforme apresentado anteriormente, a dispersão da argila e, conseqüentemente, a redução da condutividade hidráulica são proporcionais ao SAR do fluido percolante. Assim, à medida que o valor de SAR do fluido na coluna aumenta, mais porções de argila são afetadas pela dispersão e, conseqüentemente, menor será a condutividade hidráulica. Não é possível perceber uma tendência de variação na condutividade elétrica (CE) nem no pH do fluido.

Figura 6.35: Variação de k e CE, pH e SAR x Volume de poros – Solo Várzea CP1



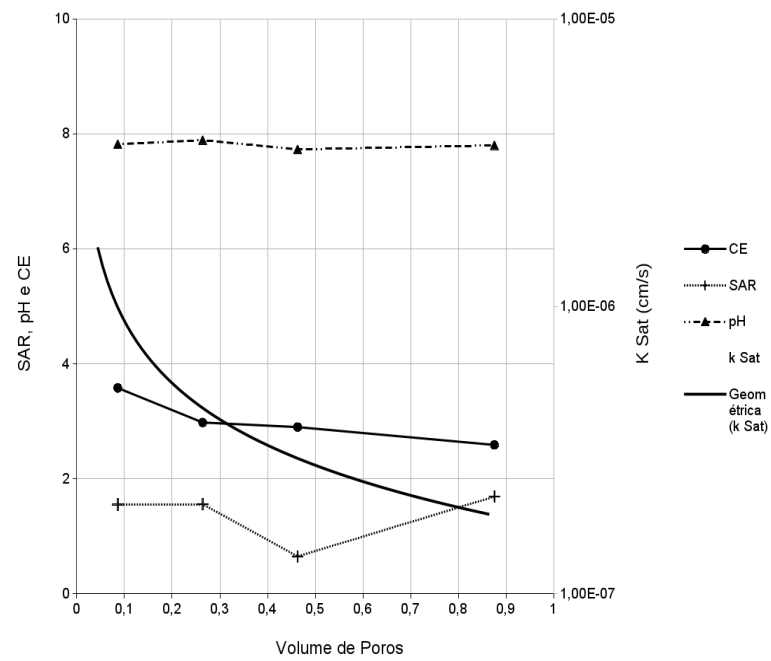
Fonte: O autor

Figura 6.36: Variação de k e CE, pH e SAR x Volume de poros – Solo Várzea CP2



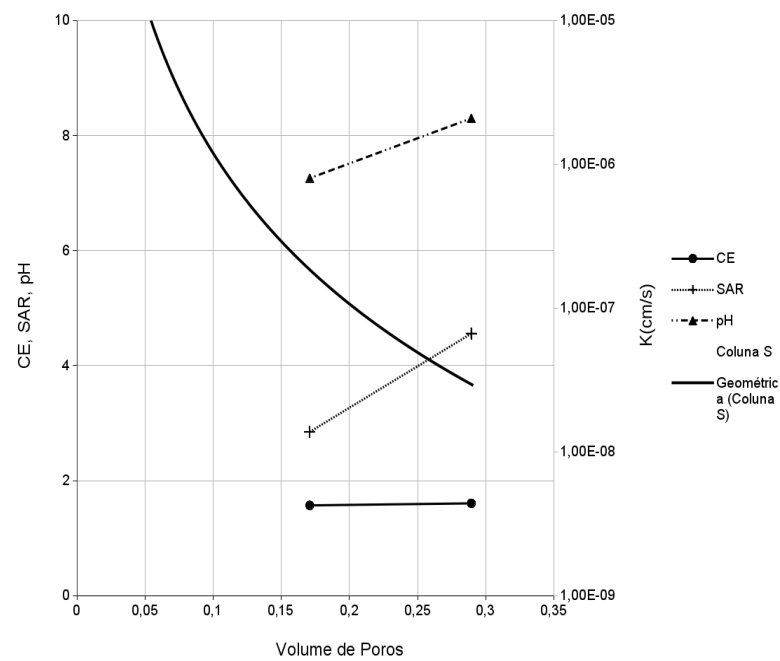
Fonte: O autor

Figura 6.37: Variação de k e CE, pH e SAR x Volume de poros – Solo Várzea CP4



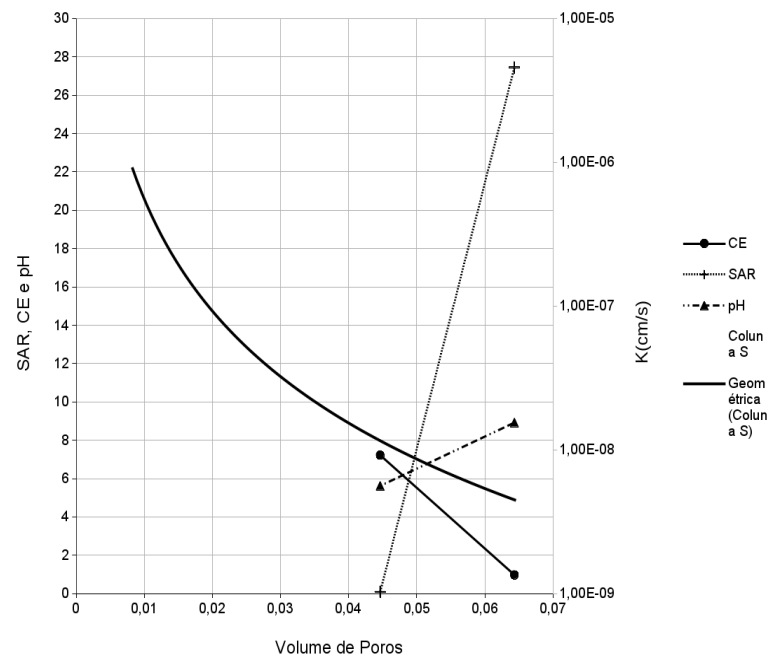
Fonte: O autor

Figura 6.38: Variação de k, CE, pH e SAR x Volume de poros – Solo Piçarra CP4



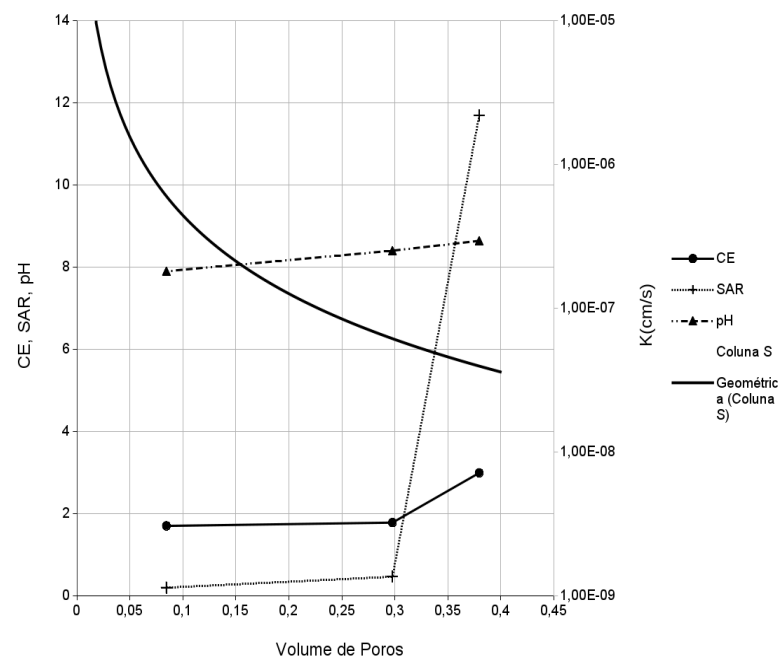
Fonte: O autor

Figura 6.39: Variação de k, CE, pH e SAR x Volume de poros – Solo Piçarra CP5



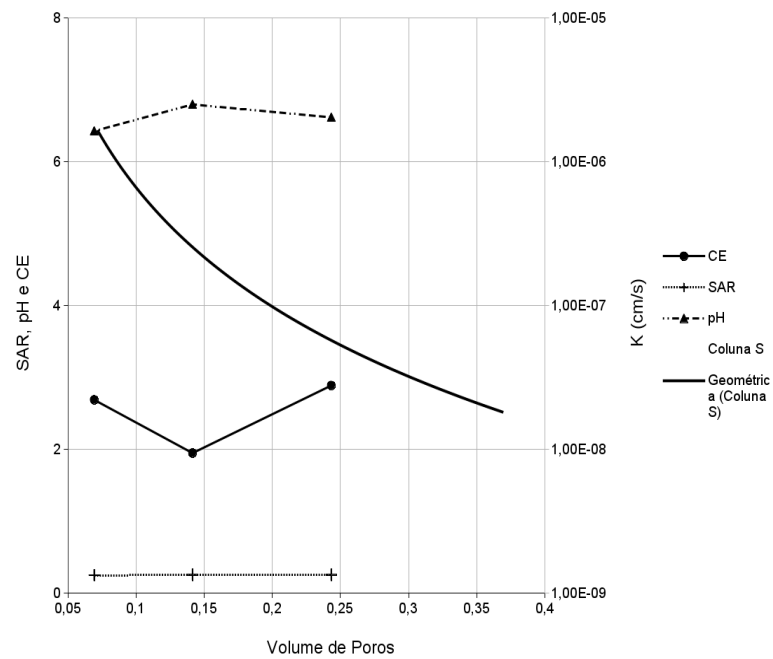
Fonte: O autor

Figura 6.40: Variação de k, CE, pH e SAR x Volume de poros – Solo Piçarra CP6



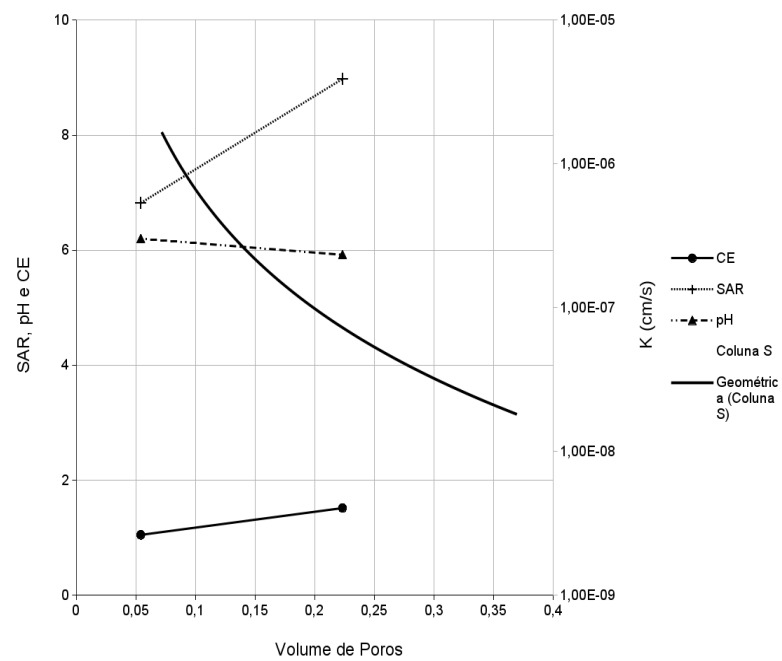
Fonte: O autor

Figura 6.41: Variação de k e CE, pH e SAR x Volume de poros – Solo Piçarra CP8



Fonte: O autor

Figura 6.42: Variação de k e CE, pH e SAR x Volume de poros – Solo Piçarra CP9



Fonte: O autor

Através dos ensaios de FRX foram determinadas as concentrações dos principais metais nos solos utilizados, antes e depois dos ensaios. É importante salientar que o método possui a limitação de determinar apenas a concentração dos metais que possuem massa molecular superior à do magnésio. Deste modo, as concentrações das substâncias como o sódio (Na) e o magnésio (Mg) não foram determinadas neste ensaio.

Tabela 6.10: FRX - Concentração dos Principais Elementos

Solo	Amostra	Concentração dos Elementos (%)							
		Al	Si	Cl	K	Ca	Ti	Fe	Co
Vermelho	Original	7,39	33,17	1,57	1,13	0,45	0,35	0,45	0,23
Vermelho	CP1	4,82	24,57	10,87	2,69	1,65	1,50	2,59	1,60
Vermelho	CP2	5,76	29,55	6,71	2,55	1,15	1,02	1,08	0,75
Várzea	Original	8,91	26,97	1,82	3,27	5,26	0,50	0,70	0,37
Várzea	CP1	4,05	20,05	7,96	6,82	12,45	1,75	1,75	1,14
Várzea	CP2	4,44	20,37	4,52	5,11	9,43	1,12	1,51	0,75
Várzea	CP4	1,29	16,35	9,32	8,17	14,67	2,29	2,14	1,76
Piçarra	Original	15,85	25,50	1,19	0,00	0,14	1,22	1,21	0,33
Piçarra	CP1	11,71	23,78	6,33	0,56	0,57	2,97	2,05	0,95
Piçarra	CP4	9,46	22,46	10,02	0,16	0,45	4,68	3,51	1,80
Piçarra	CP5	13,05	23,35	7,98	0,00	0,24	2,41	1,57	0,52
Piçarra	CP6	12,06	22,55	7,92	0,05	0,20	3,38	2,48	1,28
Piçarra	CP8	10,41	21,00	10,48	0,05	0,34	3,55	3,91	2,07
Piçarra	CP9	7,68	18,09	22,75	3,79	0,00	2,06	2,77	1,65

Fonte: O autor

A diminuição da concentração dos elementos Alumínio (Al) e Silício (Si) sugerem que há uma redução na quantidade de argilominerais, visto que esses são seus principais componentes. Como é possível verificar na Figura 6.43, as coletas n° 17 e n° 18 apresentam relevante quantidade de partículas finas depositadas no fundo do frasco de vidro, enquanto nas primeiras coletas (n° 1, 2, 5 e 6) é menos evidente a sua presença.

O aumento da concentração de potássio (K) e Cálcio (Ca), no ensaio FRX, fornece, em princípio, um resultado oposto à análise química do efluente, a qual indicaria a perda destes cátions pelo solo. Apesar desta incoerência, como o resultado dado pelo ensaio FRX é de caráter semiquantitativo, é possível que a diminuição da quantidade absoluta de outros elementos, por exemplo Alumínio e Silício, esteja aumentando a concentração relativa dos outros elementos no resultado do ensaio.

Figura 6.43: Fluido percolado coletado – Várzea

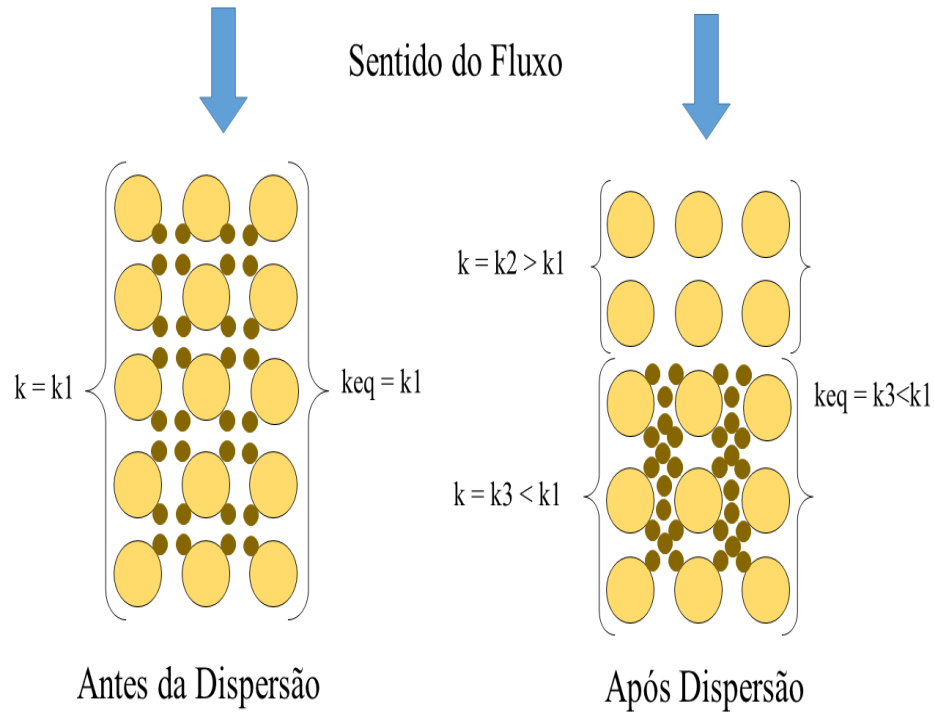


Fonte: O autor

O fenômeno da redução da condutividade hidráulica devido à dispersão da argila pode ser ilustrada pela Figura 6.44. Antes da dispersão, a estrutura porosa possui condutividade hidráulica constante ao longo do perfil de percolação, já que as frações finas e grossas estão distribuídos uniformemente. À medida que a argila é dispersa e é transportada para as camadas inferiores do solo, forma-se uma camada mais permeável que o meio poroso inicial acima e uma menos permeável que o meio poroso inicial abaixo. Como se trata de um sistema em série, a condutividade hidráulica equivalente é ditada pelo trecho com menor

condutividade hidráulica, resultando que, com o passar do tempo, a condutividade hidráulica do meio seja reduzida.

Figura 6.44: Aumento da tortuosidade gerado por dispersão da argila



Fonte: O autor

6.7.2. Verificação Da Hipótese De Obstrução Dos Poros Por Filtração Dos Orgânicos

A hipótese de obstrução dos Poros por Filtração dos Orgânicos foi verificada em função dos resultados obtidos no ensaio STV e da distribuição do tamanho dos poros a partir da curva de retenção do solo. A tabela 6.11 apresenta os valores de STV obtidos antes e após a realização dos ensaios.

Tabela 6.11: Quantidade de Sólidos Totais Voláteis

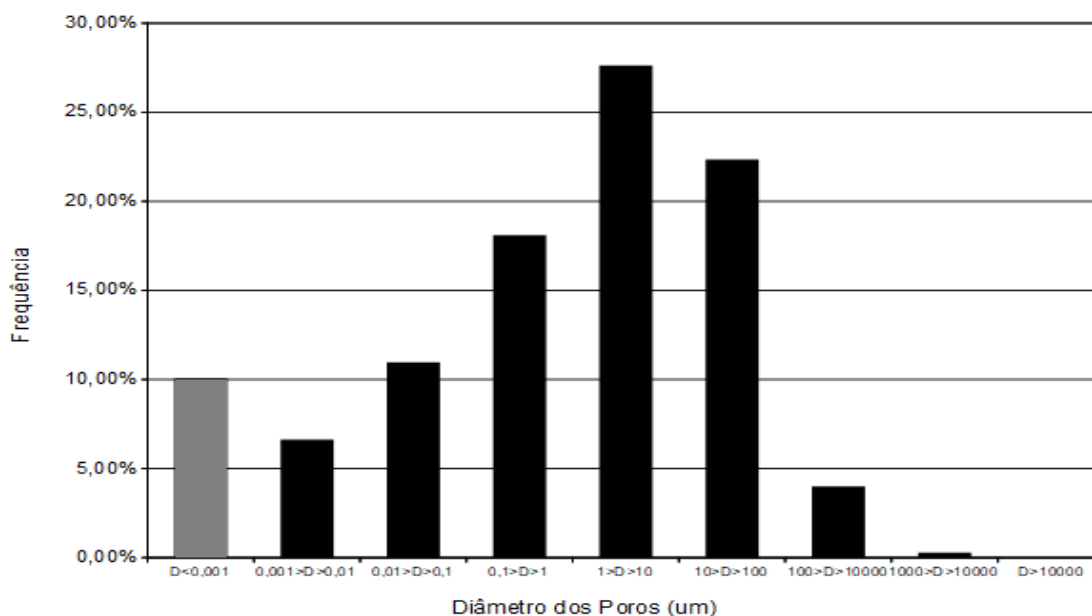
Descrição do Solo	CP e Posição	Quantidade de	Quantidade de	Diferença – Após Ensaio (%)
		Matéria Orgânica - Antes (%)	Matéria Orgânica - Após(%)	
Solo Vermelho	CP1 Topo	2,00	2,64	0,64
Solo Vermelho	CP1 Base	2,00	2,68	0,68
Solo Vermelho	CP2 Topo	2,00	2,56	0,56
Solo Vermelho	CP2 Base	2,00	2,53	0,53
Solo Várzea	CP1 Topo	3,93	4,41	0,52
Solo Várzea	CP1 Base	3,93	4,81	0,37
Solo Várzea	CP2 Topo	3,93	4,45	0,48
Solo Várzea	CP2 Base	3,93	4,30	0,88
Solo Várzea	CP4 Topo	3,93	4,22	0,29
Solo Várzea	CP4 Base	3,93	4,12	0,22
Solo Piçarra	CP1 Topo	9,31	9,11	-0,20
Solo Piçarra	CP1 Base	9,31	9,07	-0,24
Solo Piçarra	CP4 Topo	9,31	9,87	0,56
Solo Piçarra	CP4 Base	9,31	9,97	0,66
Solo Piçarra	CP5 Topo	9,31	8,98	-0,33
Solo Piçarra	CP5 Base	9,31	8,70	-0,61
Solo Piçarra	CP6 Topo	9,31	8,71	-0,60
Solo Piçarra	CP6 Base	9,31	8,49	-0,82
Solo Piçarra	CP7 Topo	9,31	7,82	-1,49
Solo Piçarra	CP7 Base	9,31	8,51	-0,80
Solo Piçarra	CP8 Topo	9,31	8,27	-1,04
Solo Piçarra	CP8 Base	9,31	8,59	-0,72
Solo Piçarra	CP9 Topo	9,31	6,67	-2,64
Solo Piçarra	CP9 Base	9,31	6,72	-2,59

Fonte: O autor

Conforme se pode observar, a não ser para o caso do solo Piçarra, há um aumento nos valores de STV do solo com a realização dos ensaios de coluna. Este fenômeno sugere que apenas os solos vermelho e várzea possuiriam microporos passíveis de serem obstruídos pelas moléculas de hidrocarbonetos dissolvidas na água de produção, enquanto, provavelmente, o solo piçarra sofreu lavagem dos seus orgânicos durante a percolação..

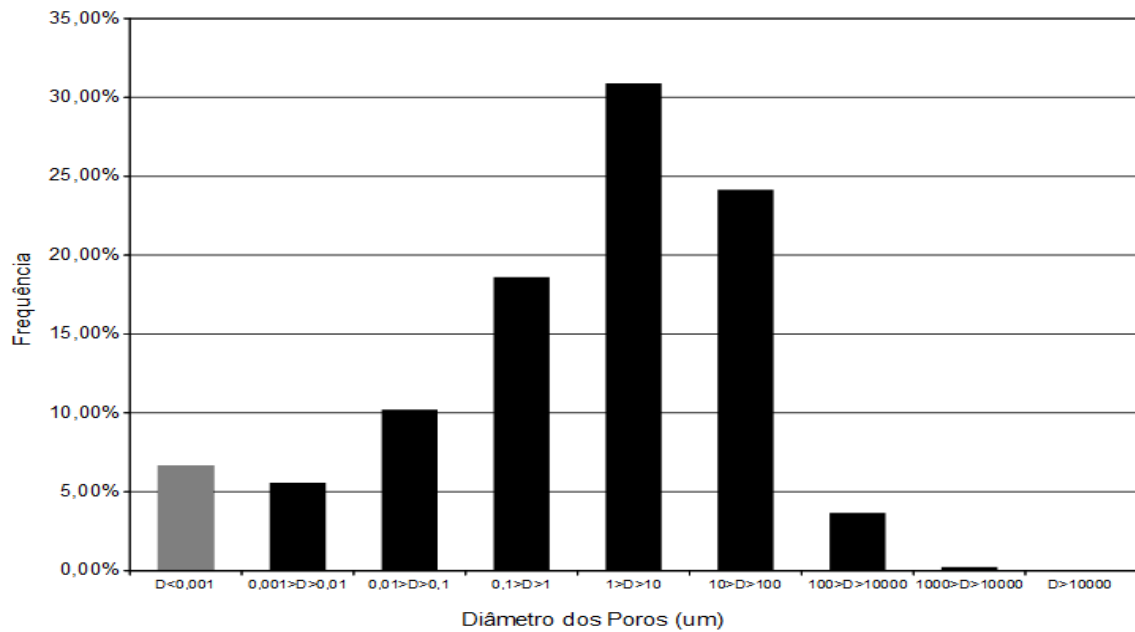
Analisando a estrutura de cada solo através da distribuição do tamanho dos poros foi possível verificar que o solo piçarra, de fato, é o único que não possui microporos com diâmetro menor que $0,001 \mu\text{m}$. De acordo com a Figura 4.10 de Momper (1978), as moléculas de hidrocarbonetos aromáticos, aqueles que são a maioria dos hidrocarbonetos dissolvidos na água de produção, teriam diâmetro equivalente variando entre $0,0004 \mu\text{m}$ e $0,002 \mu\text{m}$. Nas Figuras 6.45 e 6.46 estão destacadas as quantidades relativas aproximadas de poros passíveis de obstrução pelos hidrocarbonetos aromáticos.

Figura 6.45: Solo Vermelho - Frequência de Tamanho de Poros e poros passíveis de obstrução pela fase dissolvida



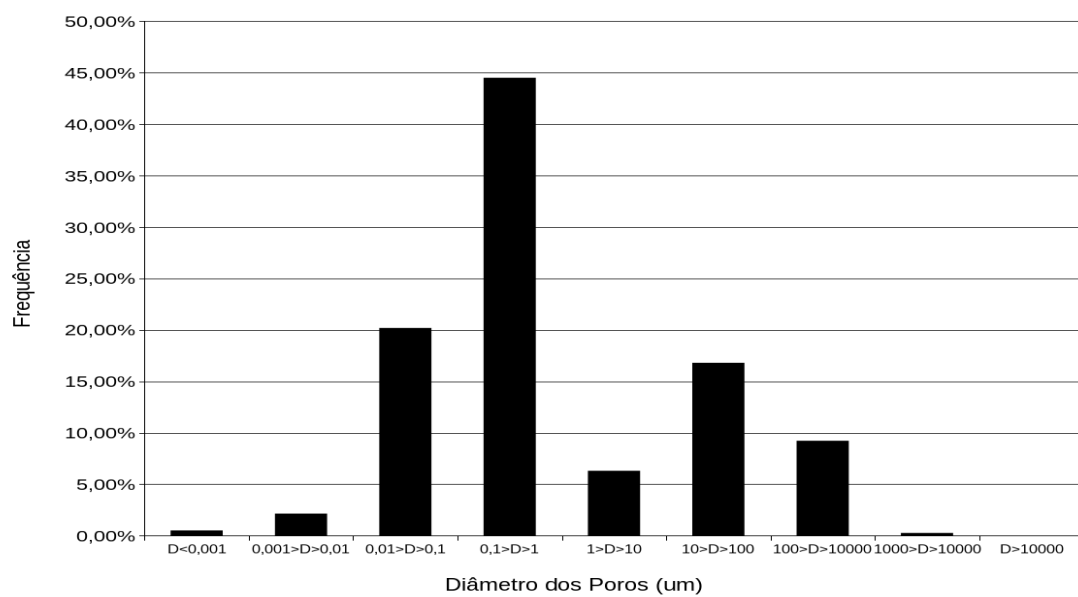
Fonte: O autor

Figura 6.46: Solo Várzea - Frequência de Tamanho de Poros e poros passíveis de obstrução pela fase dissolvida



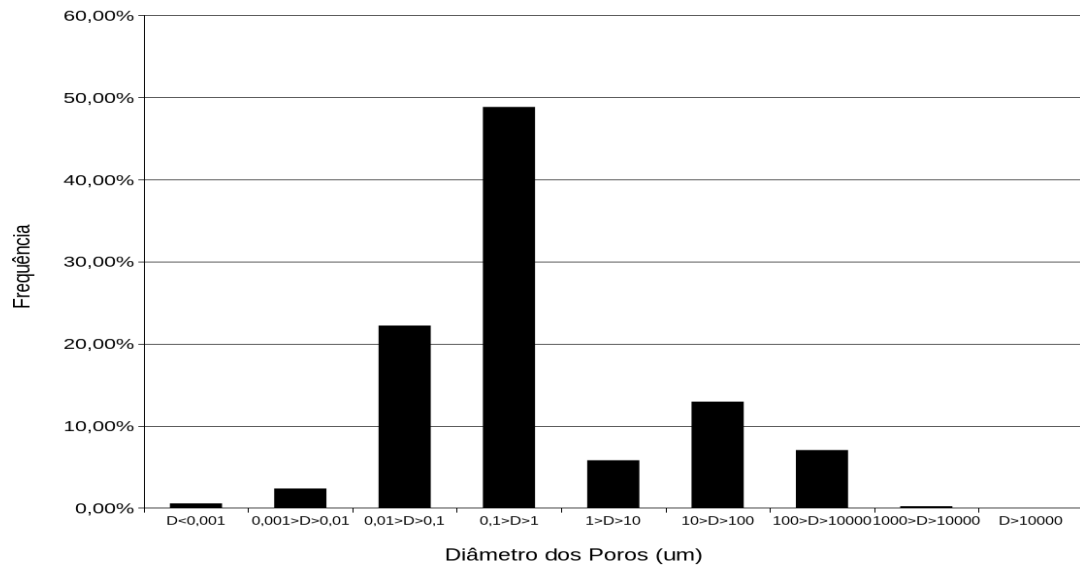
Fonte: O autor

Figura 6.47: Solo Piçarra Proctor Normal - Frequência de Tamanho de Poros e poros passíveis de obstrução pela fase dissolvida



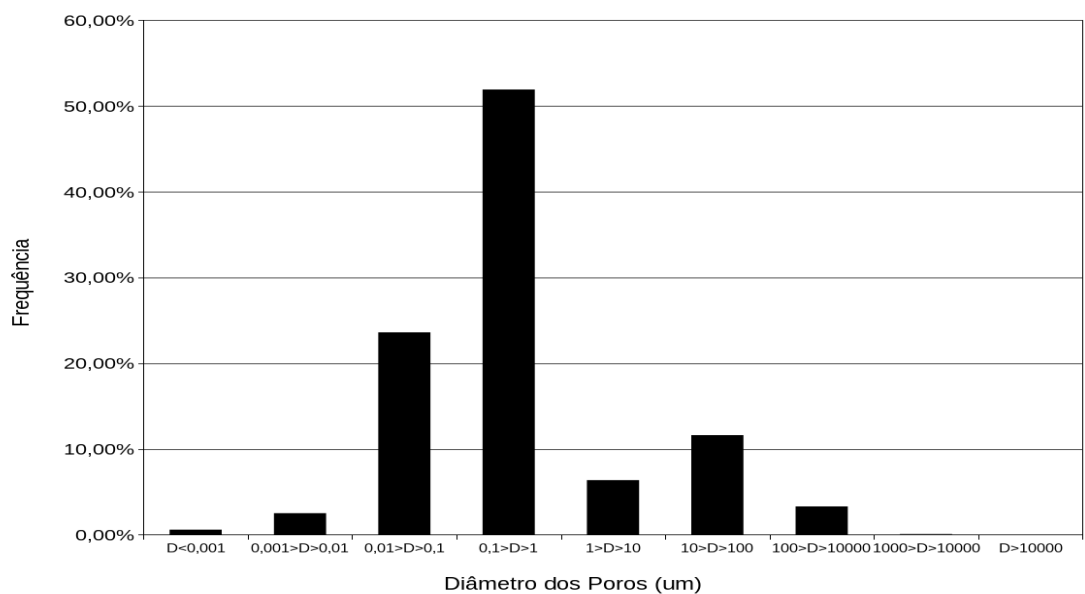
Fonte: O autor

Figura 6.48: Solo Piçarra E = 9kgf.cm/cm³ - Frequência de Tamanho de Poros e poros passíveis de obstrução pela fase dissolvida



Fonte: O autor

Figura 6.49: Solo Piçarra Proctor Intermediário - Frequência de Tamanho de Poros e poros passíveis de obstrução pela fase dissolvida



Fonte: O autor

Também é possível observar que mais da metade dos poros dos solos possuem tamanho menor do que o tamanho das partículas de hidrocarbonetos dispersas no fluido, que varia entre 20 μm e 120 μm , conforme apresentado no Capítulo 4.3.2.2. Tal fato poderia induzir à formação de uma superfície de filtração localizada no topo do corpo de prova. Contudo, a ocorrência desta superfície não foi constatada durante nenhum ensaio. A hipótese para a não formação da superfície de filtração é que a reduzida velocidade de percolação permitiu que mesmo as pequenas gotas dispersas no fluido tivessem tempo suficiente para emergir ao topo da coluna do reservatório. Desta maneira, as gotas dispersas nunca entrariam em contato com o solo do ensaio.

6.7.3. Verificação Da Hipótese De Obstrução Dos Poros Por Atividade Microbiana

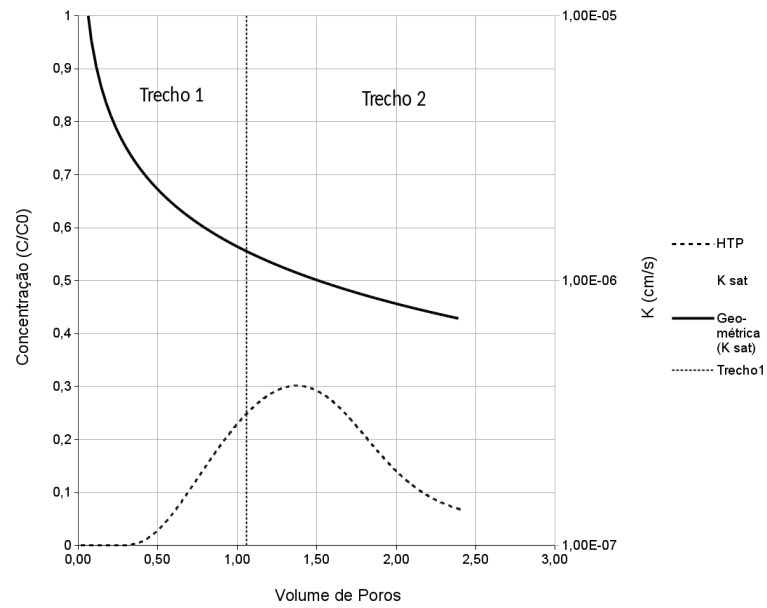
Através das análises da atividade microbiana a partir da inoculação e contagem do número de colônias foi possível verificar a ocorrência de degradação das moléculas orgânicas durante os ensaios do Solo Várzea. Conforme apresentado no capítulo 4.3.2.3, a biodegradação de compostos orgânicos pode viabilizar o crescimento de colônias e do biofilme correspondente, diminuindo a porosidade do meio e conseqüentemente a permeabilidade saturada. Além da verificação da atividade microbiana, através do perfil de decaimento da curva de chegada é possível estimar quando há degradação e, conseqüentemente, quando há obstrução dos poros, decorrente deste fenômeno. Para realizar esta verificação, os gráficos contendo a curva de condutividade hidráulica e a curva de chegada foram divididos em dois trechos, conforme apresentado nas Figuras 6.50 a 6.52 : trecho 1 quando supostamente ainda não ocorre a biodegradação ($t < t_0$); trecho 2 em que começa a atividade microbiana ($t > t_0$). A tabela 6.12 mostra a variação da condutividade hidráulica nos dois trechos.

Tabela 6.12: Variação de Condutividade Hidráulica nos Trechos 1 e 2

CP	Trecho 1 - k_i / k_f (cm/s)	Trecho 2 - k_i / k_f (cm/s)
1	14,84	2,00
2	6,97	1,92
4	4,21	1,54

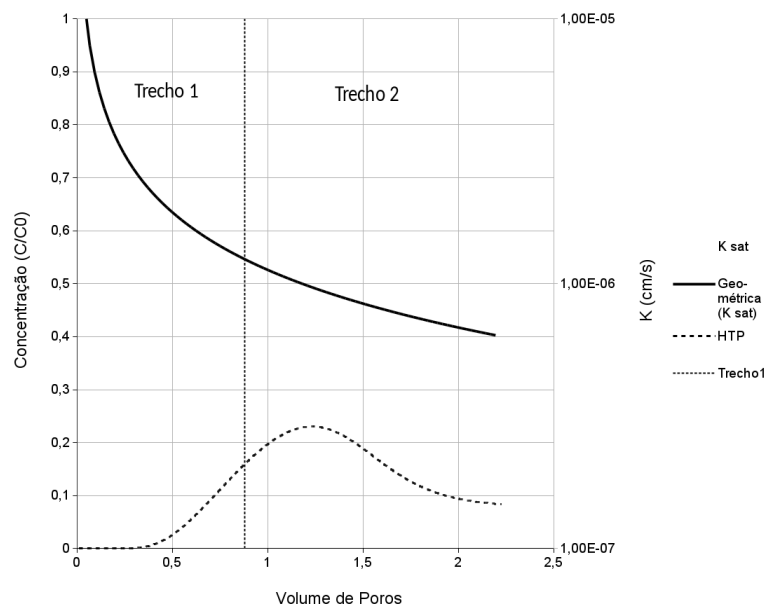
Fonte: O Autor

Figura 6.50: Variação de k e Concentração de HTP x Volume de poros – Solo Várzea CP1



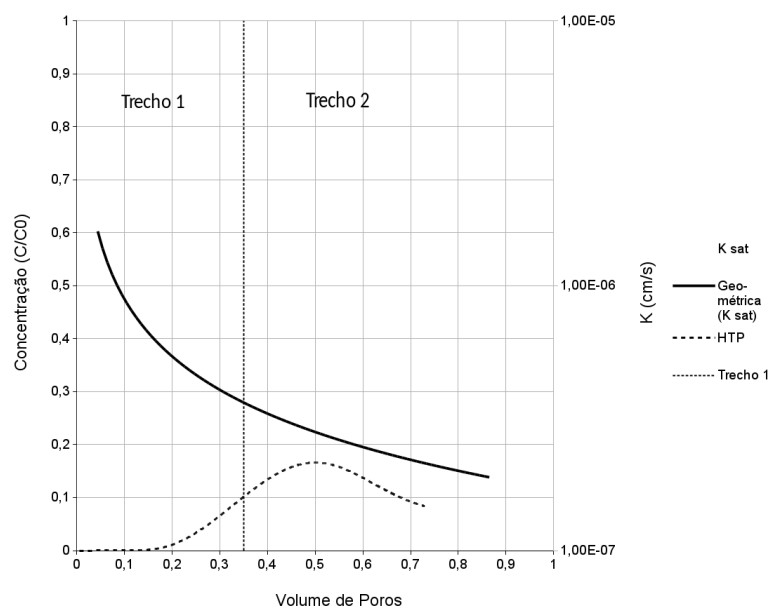
Fonte: O autor

Figura 6.51: Variação de k e Concentração de HTP x Volume de poros – Solo Várzea CP2



Fonte: O autor

Figura 6.52: Variação de k e Concentração de HTP x Volume de poros – Solo Várzea CP4



Fonte: O autor

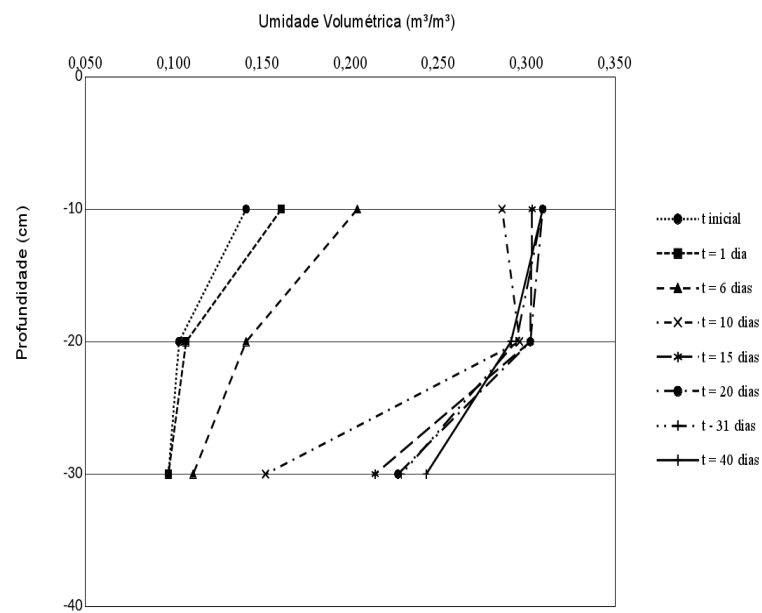
A partir da análise das Figuras 6.50 a 6.52 e da Tabela 6.12 é possível constatar no trecho 1, quando em teoria não ocorre atividade microbiana, ocorre a maior parte da redução da permeabilidade, o que tende a descartar a atividade microbiana como a causa principal da redução da condutividade hidráulica.

6.8. Monitoramento da Infiltração

6.8.1. Perfis De Infiltração

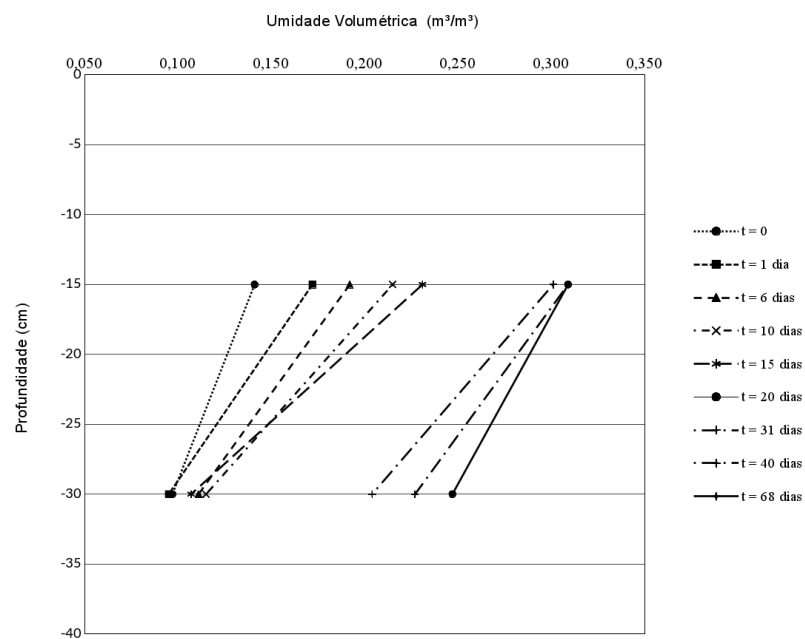
Os perfis de infiltração foram determinados nos ensaios a partir dos valores lidos pelas sondas TDR, FDR e Tensiômetros. As Figuras 6.53 a 6.68 apresentam os perfis de infiltração para cada corpo de prova. Com exceção dos CP1 e CP2 do solo vermelho, os quais foram realizados apenas com sonda TDR, e os corpos de prova do solo piçarra, que estavam muito próximo ao estado de saturação, todos os ensaios fornecem informação da infiltração tanto em termos de umidade (FDR) como em termos de sucção do solo (Tensiômetro).

Figura 6.53: Vermelho CP1 - Perfis de umidade obtidos durante a infiltração



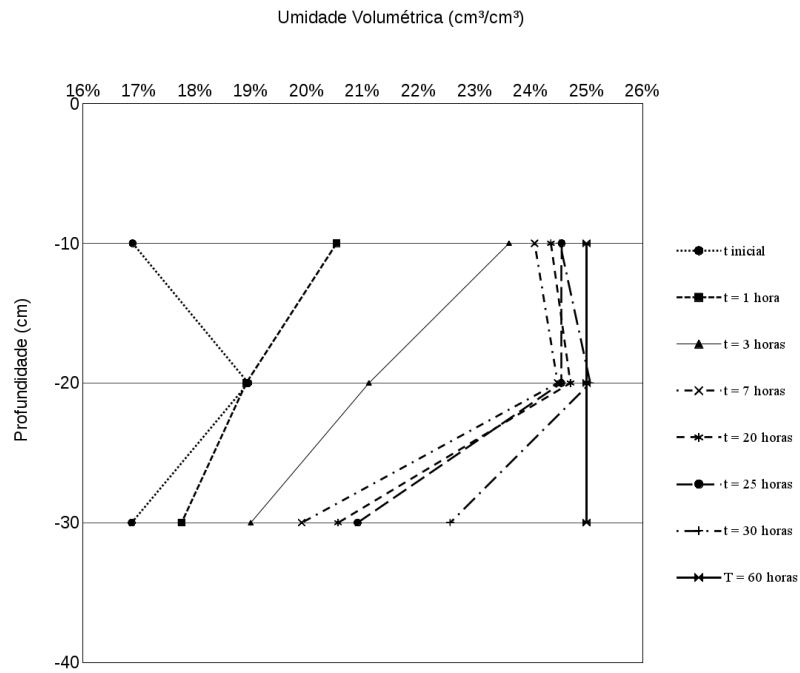
Fonte: O autor

Figura 6.54: Vermelho CP2 - Perfis de umidade obtidos durante a infiltração



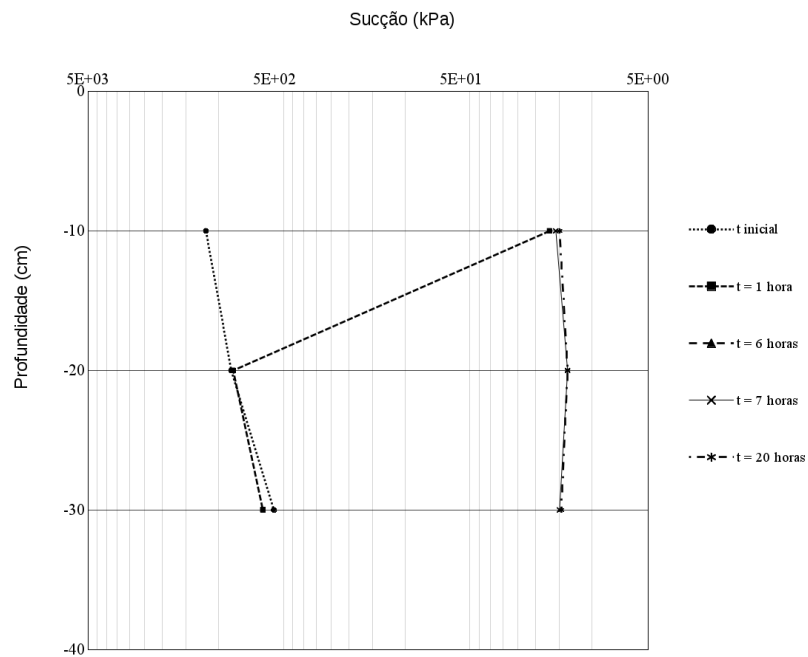
Fonte: O autor

Figura 6.55: Vermelho CP3 - Perfis de umidade obtidos durante a infiltração



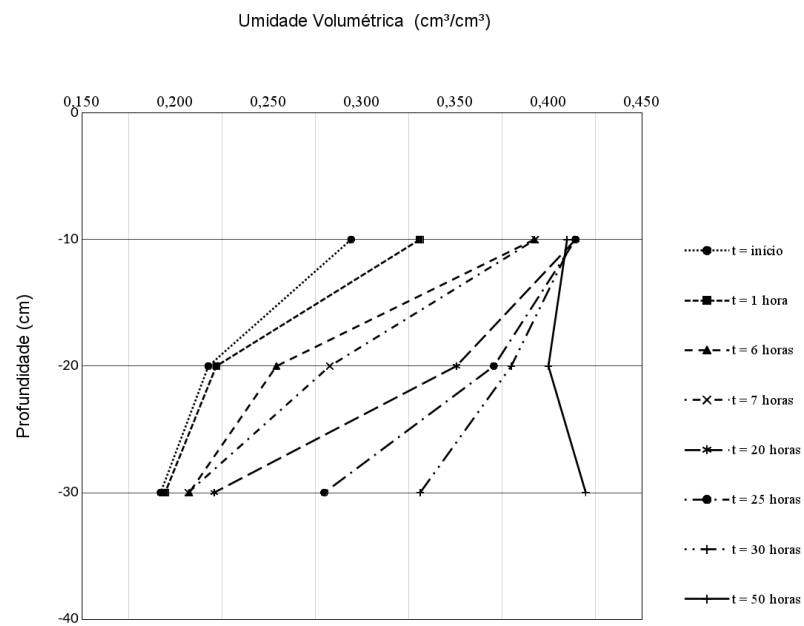
Fonte: O autor

Figura 6.56: Vermelho CP3 - Perfis de Sucção obtidos durante a infiltração



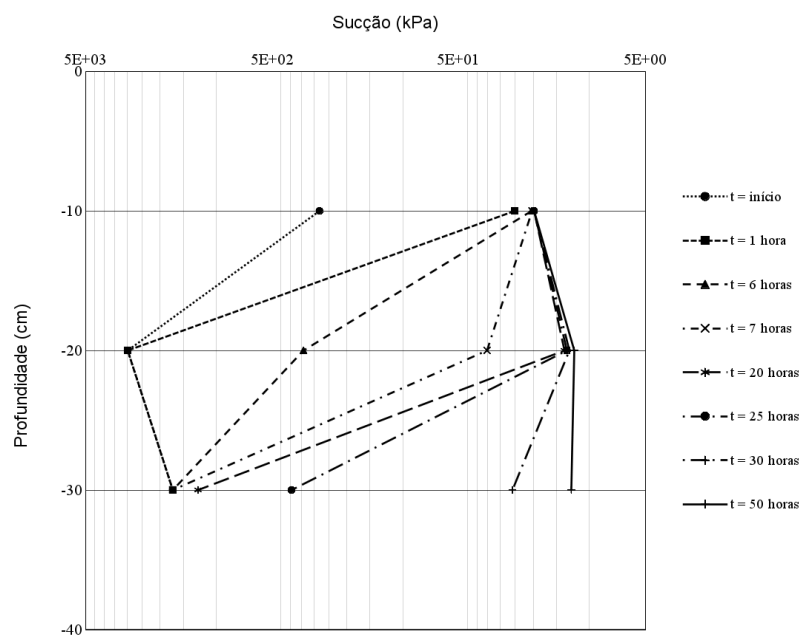
Fonte: O autor

Figura 6.57: Várzea CP1 - Perfis de umidade obtidos durante a infiltração



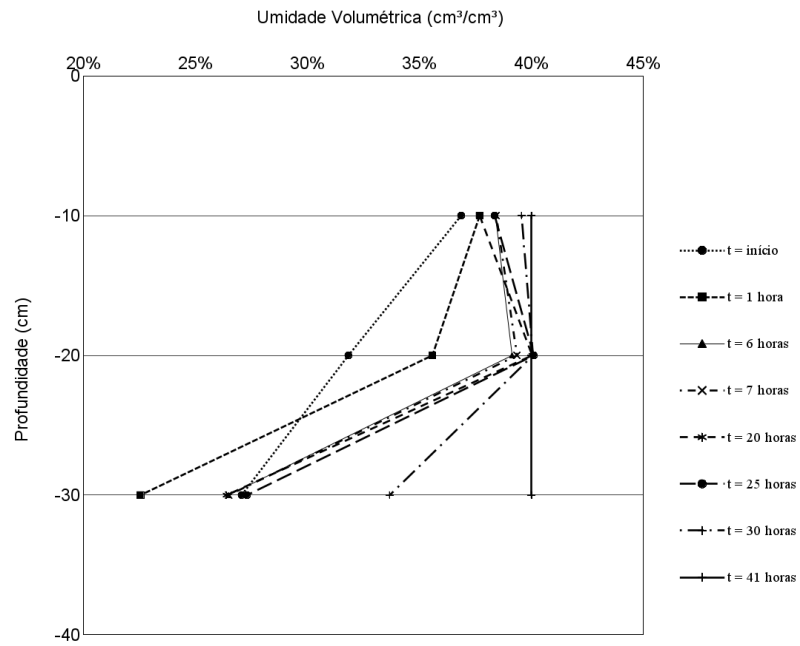
Fonte: O autor

Figura 6.58: Várzea CP1 - Perfis de Sucção obtidos durante a infiltração



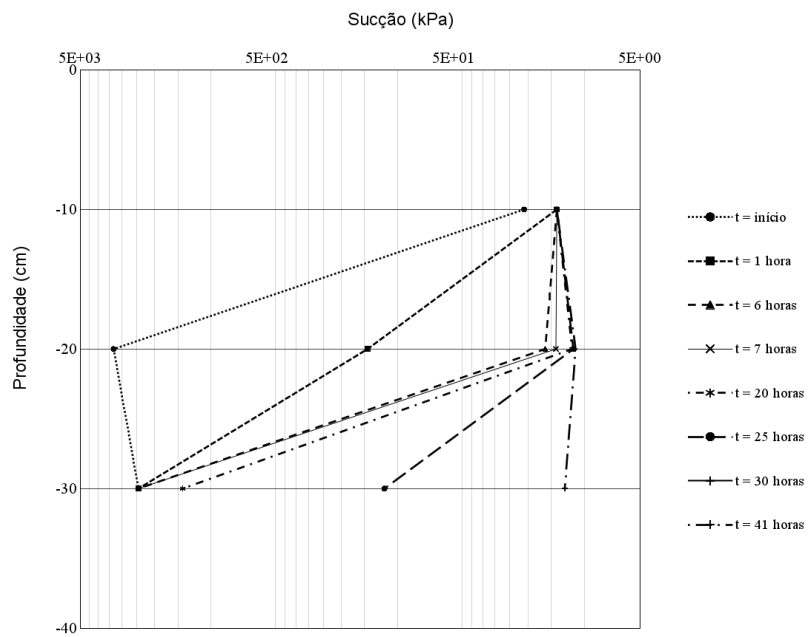
Fonte: O autor

Figura 6.59: Várzea CP2 - Perfis de umidade obtidos durante a infiltração



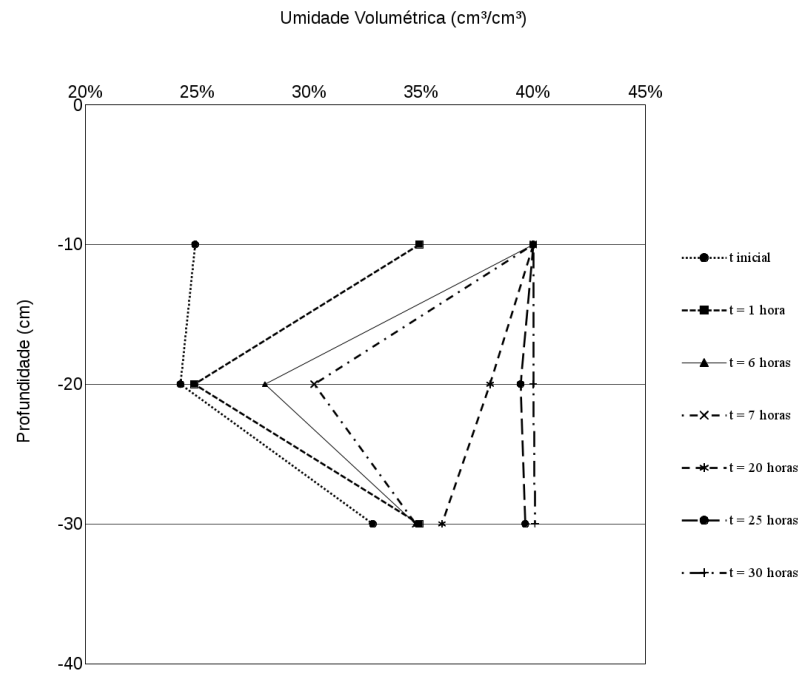
Fonte: O autor

Figura 6.60: Várzea CP2 - Perfis de Sucção obtidos durante a infiltração



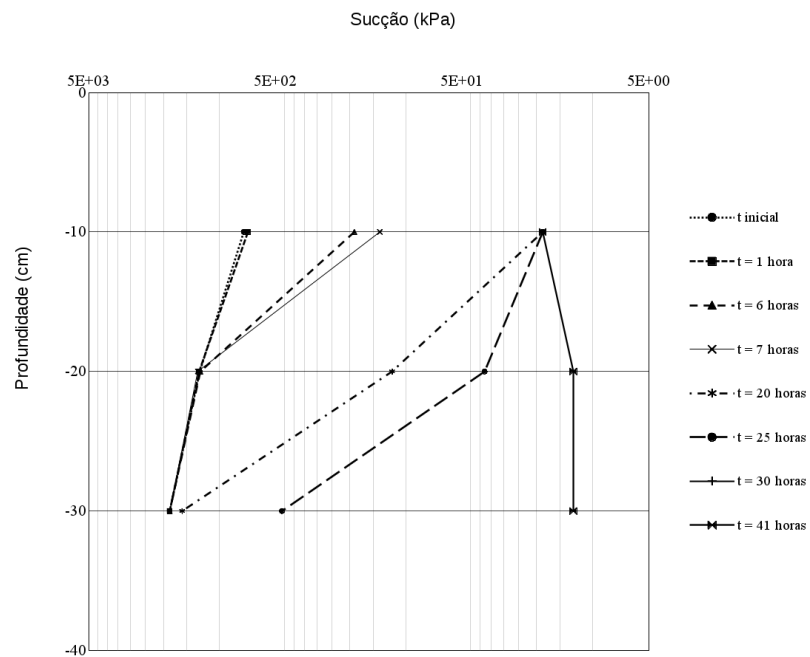
Fonte: O autor

Figura 6.61: Várzea CP4 - Perfis de umidade obtidos durante a infiltração



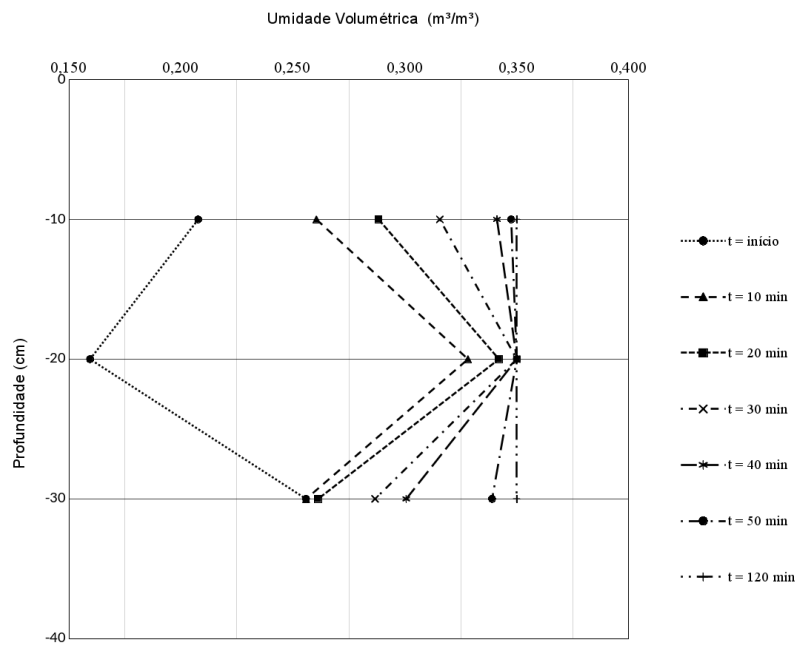
Fonte: O autor

Figura 6.62: Várzea CP4 - Perfis de Sucção obtidos durante a infiltração



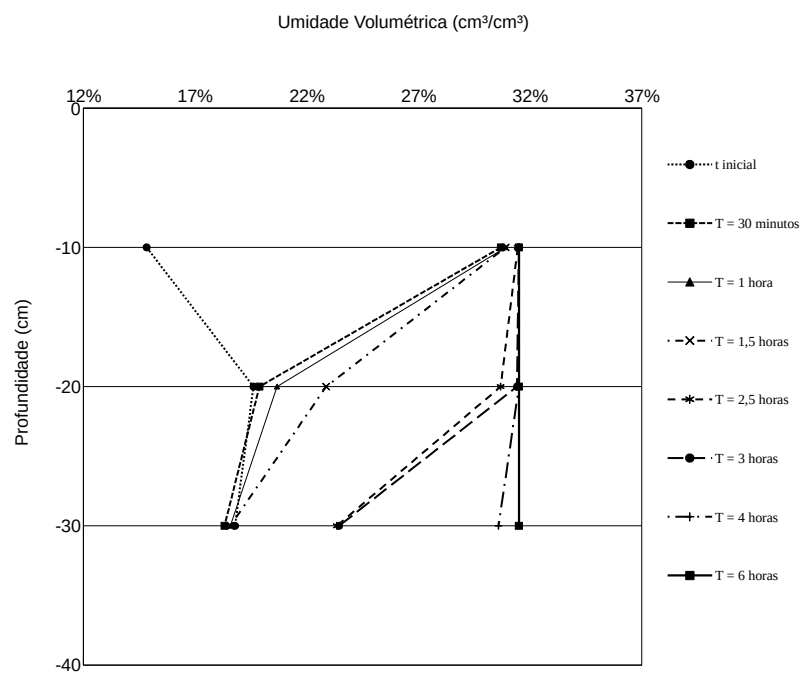
Fonte: O autor

Figura 6.63: Piçarra CP1 - Perfis de umidade obtidos durante a infiltração



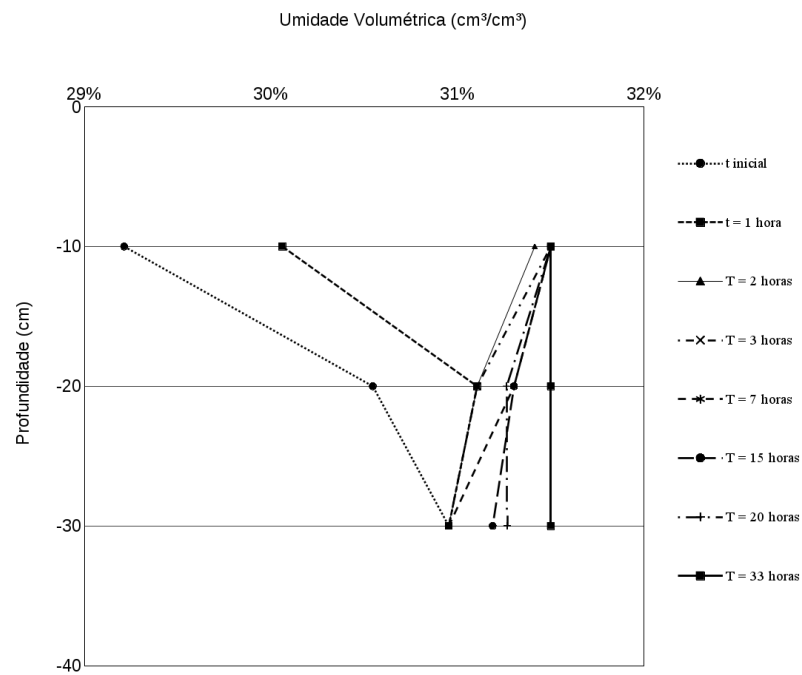
Fonte: O autor

Figura 6.64: Piçarra CP4 - Perfis de umidade obtidos durante a infiltração



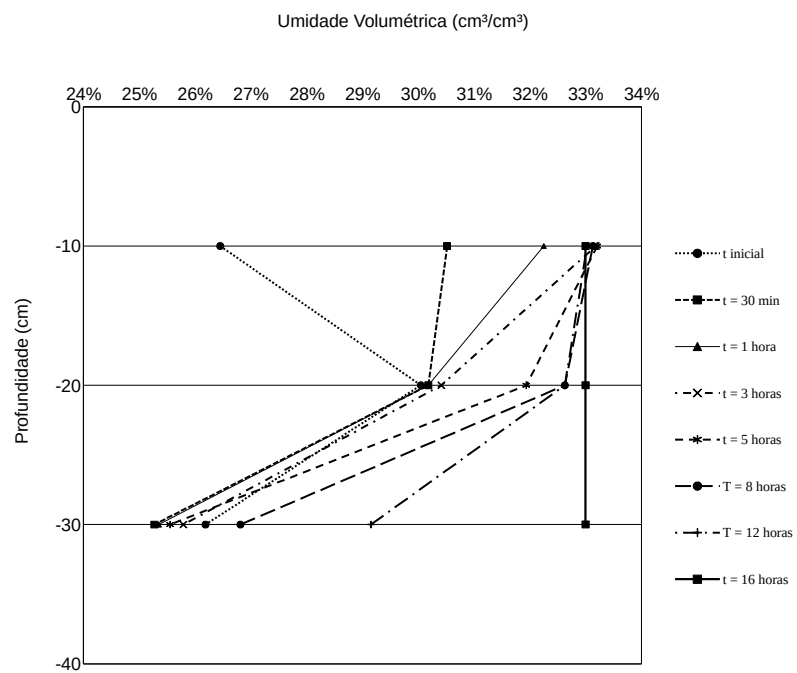
Fonte: O autor

Figura 6.65: Piçarra CP5 - Perfis de umidade obtidos durante a infiltração



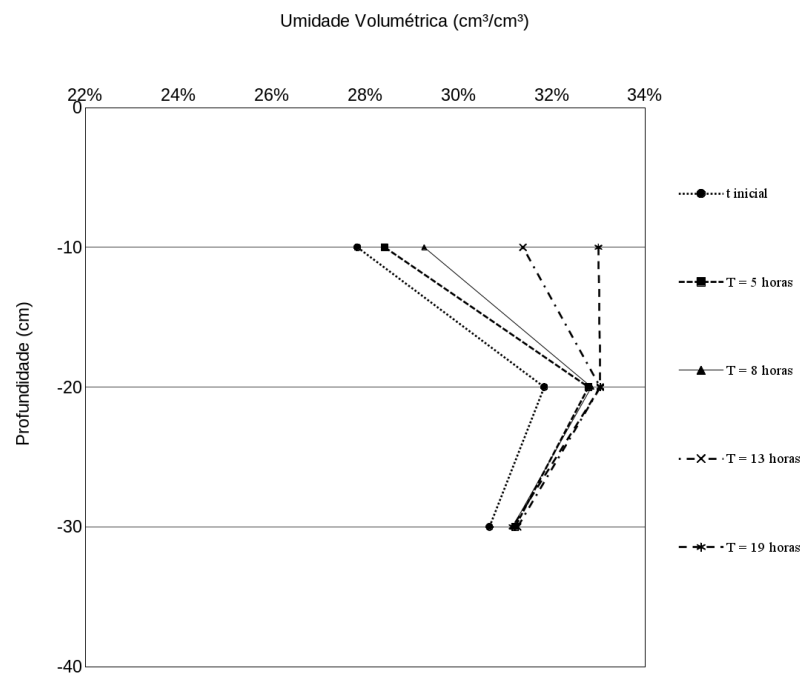
Fonte: O autor

Figura 6.66: Piçarra CP6 - Perfis de umidade obtidos durante a infiltração



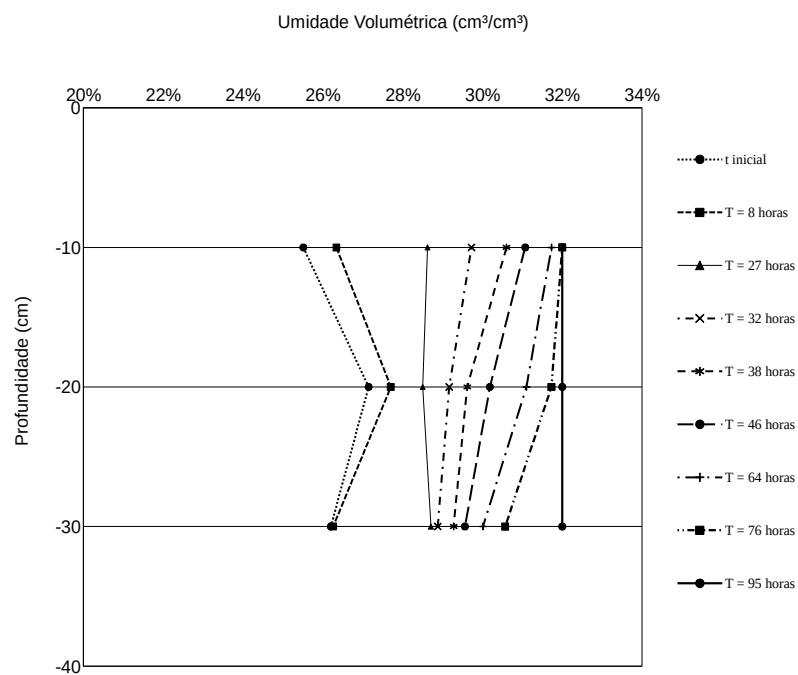
Fonte: O autor

Figura 6.67: Piçarra CP8 - Perfis de umidade obtidos durante a infiltração



Fonte: O autor

Figura 6.68: Piçarra CP9 - Perfis de umidade obtidos durante a infiltração

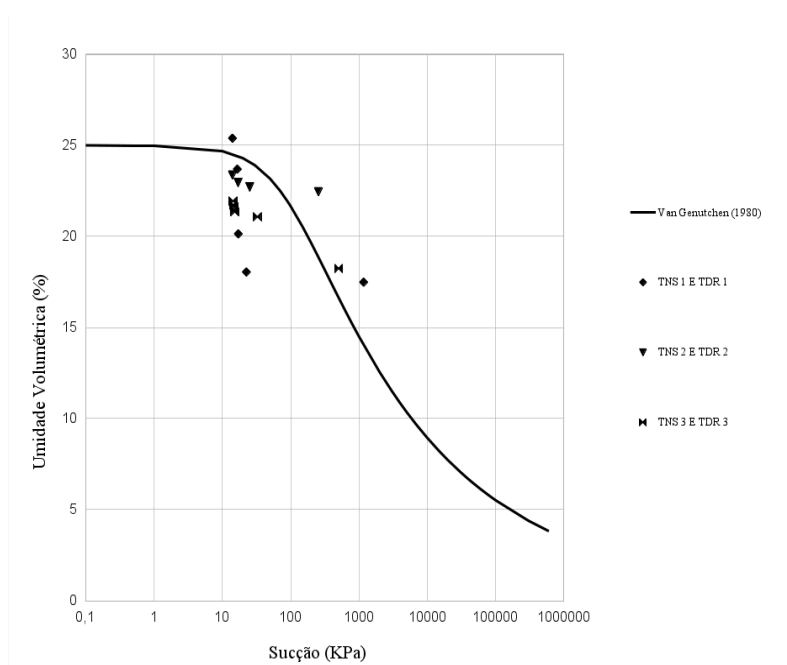


Fonte: O autor

6.8.2. Curvas De Retenção (Ensaio De Coluna)

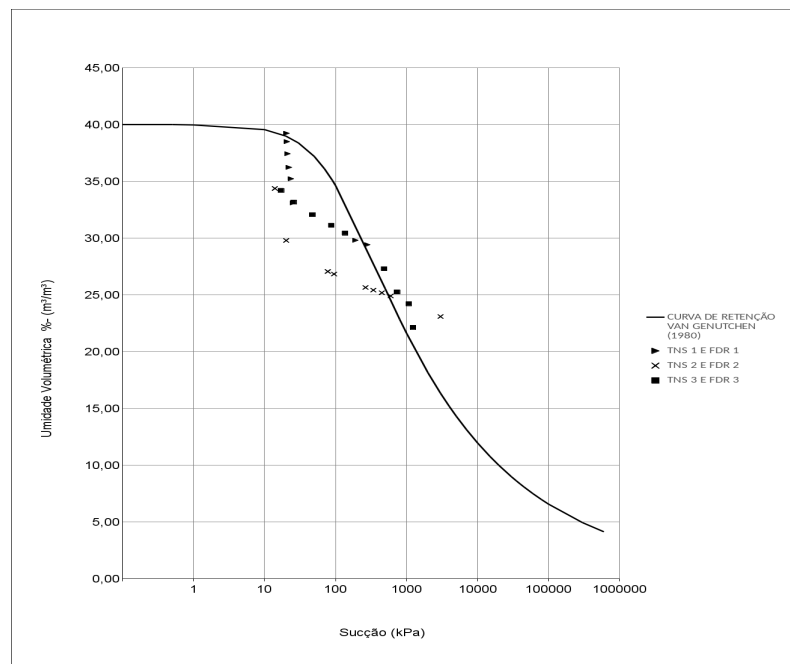
Nos ensaios de coluna monitorada, após a correção do *time-lag* provocado pelos diferentes mecanismos de medida de sucção e umidade, foram determinadas as curvas de retenção do solo relacionando-se a umidade volumétrica (θ) medida pelo FDR com a sucção total (ψ) medida pelo tensiômetro. Os pontos da curvas de retenção determinados a partir deste método abrangeram uma faixa limitada já que, no momento do umedecimento, os solos já se encontravam na umidade ótima de compactação que já é próxima da umidade de saturação. Nas Figuras 6.70 a 6.72 são apresentados os pontos definidos durante o ensaio de coluna monitorada e a curva de retenção determinada a partir dos métodos consolidados e das equações apresentadas anteriormente neste trabalho.

Figura 6.69: Solo Vermelho CP3 - Pontos obtidos por FDR e Tensiômetro e Curva de Retenção (Umedecimento)



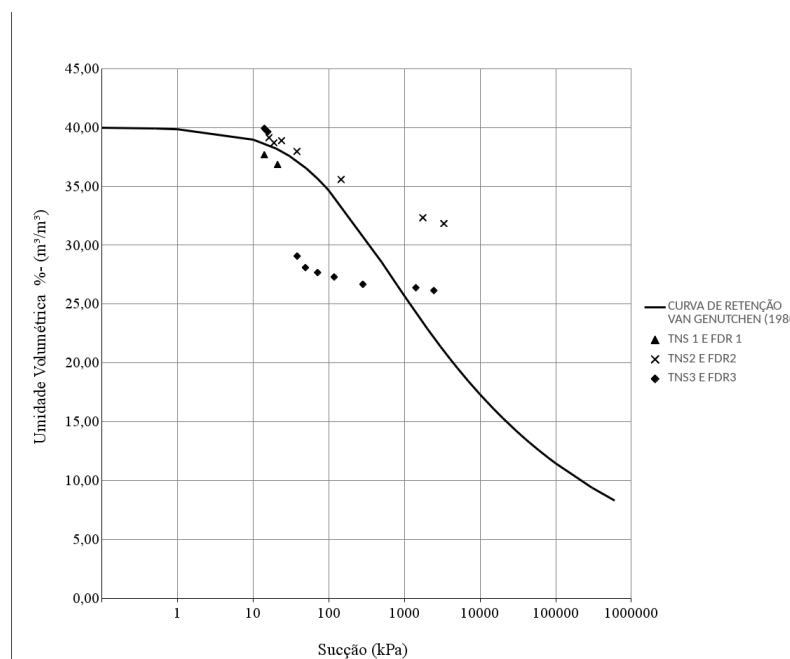
Fonte: O autor

Figura 6.70: Solo Várzea CP1 - Pontos obtidos por FDR e Tensiômetro e Curva de Retenção (Umedecimento)



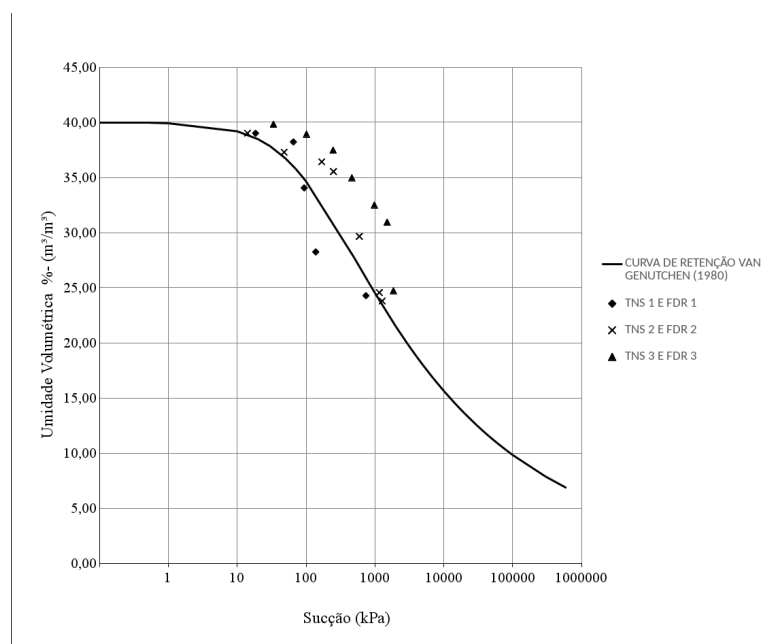
Fonte: O autor

Figura 6.71: Solo Várzea CP2 - Pontos obtidos por FDR e Tensiômetro e Curva de Retenção



Fonte: O autor

Figura 6.72: Solo Várzea CP4 - Pontos obtidos por FDR e Tensiômetro e Curva de Retenção (Umedecimento)



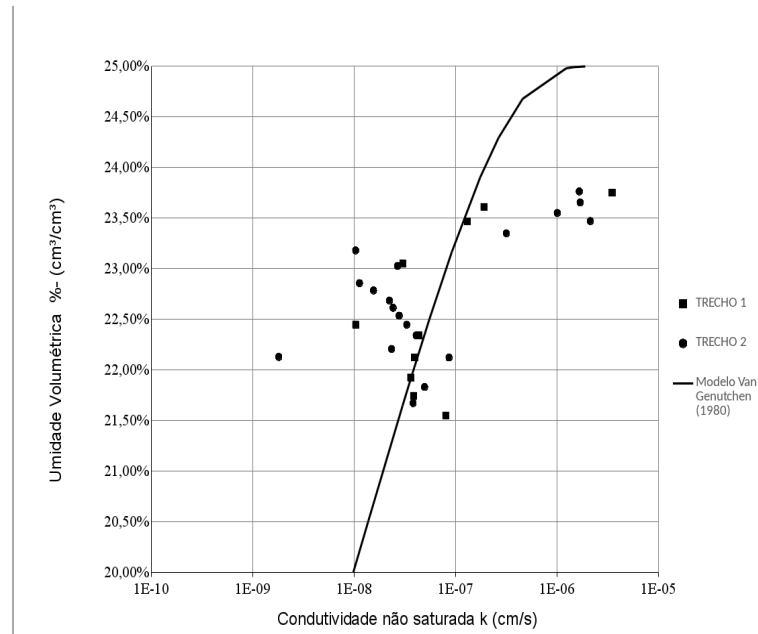
Fonte: O autor

Como é possível visualizar nas Figuras apresentadas, os valores obtidos dos ensaios de coluna se situam próximos aos valores da curva modelada a partir da equação de van Genuchten (1980). Além de imprecisão inerente ao método, é necessário se levar em conta que os ensaios foram realizados com fluidos diferentes (para a curva de retenção se utilizou água destilada; enquanto que no ensaio de coluna se utilizou água de produção).

6.8.3. Curva De Condutividade Hidráulica

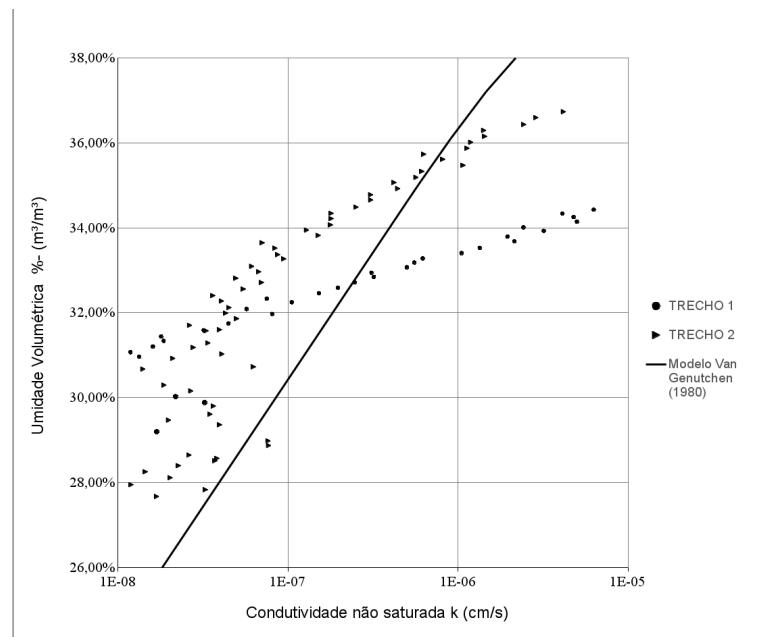
As curvas de condutividade hidráulica foram estimadas por diferentes procedimentos: a partir dos resultados obtidos com os tensiômetros e os FDR durante o ensaio de coluna através Método do Perfil Instantâneo; A partir dos parâmetros da curva de retenção modelada através da equação de Van Genuchten (1980). Nas figuras 6.73 a 6.76 são apresentadas as curvas de condutividade hidráulica estimadas por Van Genuchten (1980) e os pontos obtidos através do método do perfil instantâneo para cada ensaio de coluna monitorada.

Figura 6.73: Solo Vermelho CP3 – Pontos do Método do Perfil Instantâneo e Curva de Condutividade pela Curva de Retenção



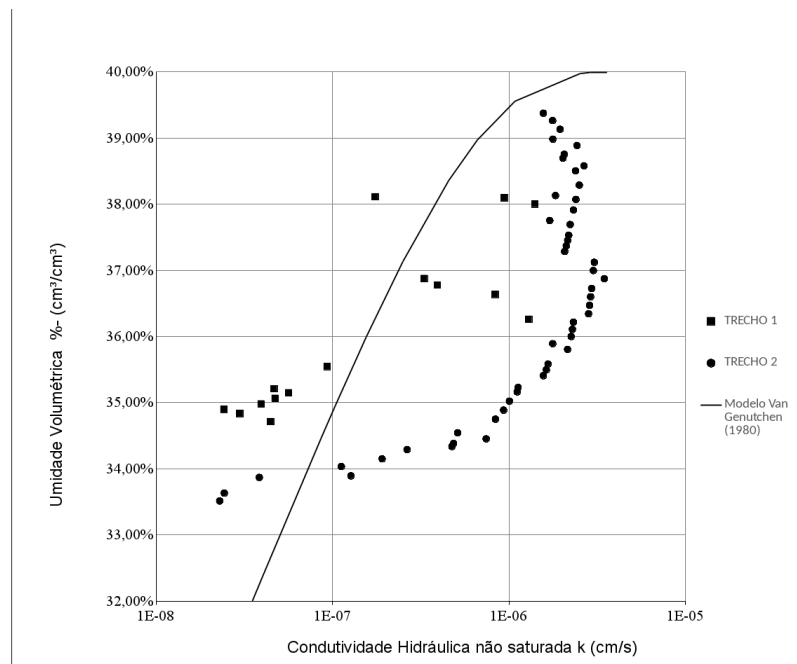
Fonte: O autor

Figura 6.74: Solo Várzea CP1 – Pontos do Método do Perfil Instantâneo e Curva de Condutividade pela Curva de Retenção



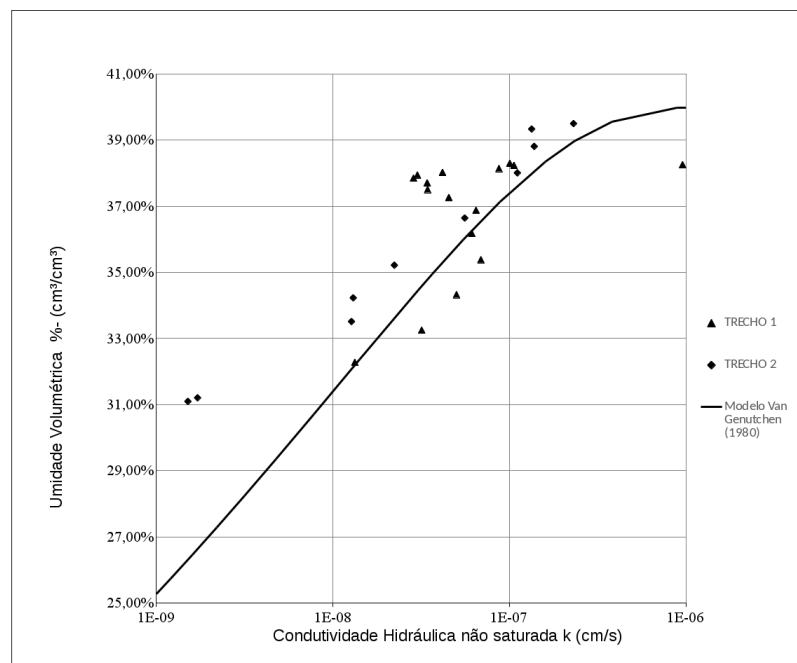
Fonte: O autor

Figura 6.75: Solo Várzea CP2 – Pontos do Método do Perfil Instantâneo e Curva de Condutividade pela Curva de Retenção



Fonte: O autor

Figura 6.76: Solo Várzea CP4 – Pontos do Método do Perfil Instantâneo e Curva de Condutividade pela Curva de Retenção



Fonte: O autor

Na Tabela 6.13, estão apresentados os parâmetros utilizados na modelagem de cada curva de condutividade hidráulica.

Tabela 6.13: Parâmetros da Curva de Condutividade Hidráulica pelo método de Van Genuchten (1980)

Solo	Corpo de Prova	k (cm/s)	α	m	n
Vermelho	CP3	3,18E-06	0,012	0,1800	1,2194
Várzea	CP1	1,30E-05	0,010	0,2084	1,2633
Várzea	CP2	5,12E-06	0,010	0,2084	1,2633
Várzea	CP4	1,81E-06	0,010	0,2084	1,2633

Fonte: O autor

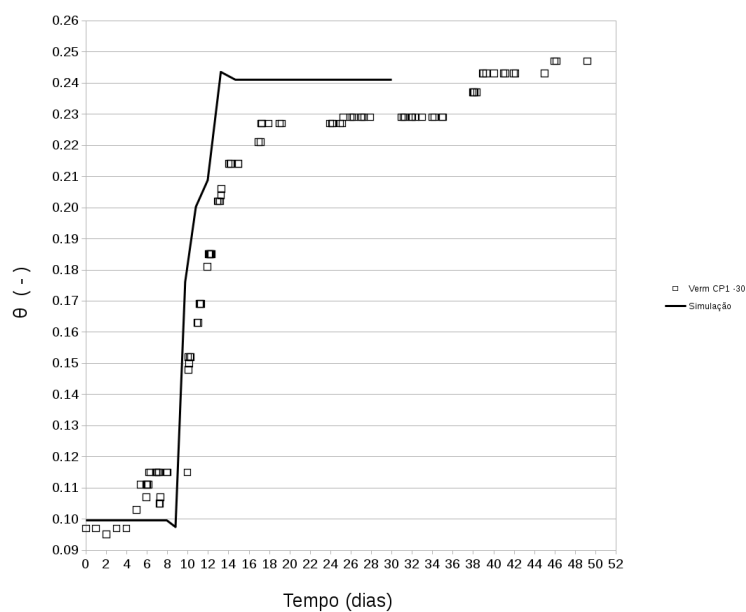
Analisando os dados apresentados nas figuras 6.73 a 6.76 e na Tabela 6.13 é possível perceber que, a não ser para o caso da figura 6.75, os pontos obtidos através do Método do Perfil Instantâneo se localizam próximos à curva traçada pelo método de Van Genuchten (1980). Também é possível constatar que os valores obtidos próximo à saturação do solo se apresentaram próximos à condutividade hidráulica saturada inicial do ensaio de coluna. Semelhante ao que foi pontuado para a determinação da curva de retenção do solo, é necessário se levar em conta que os ensaios foram realizados com fluidos diferentes (curva de retenção utilizou água destilada; ensaio de coluna utilizou água de produção).

6.9. Modelagem

6.9.1. Calibração Da Curva De Condutividade Hidráulica

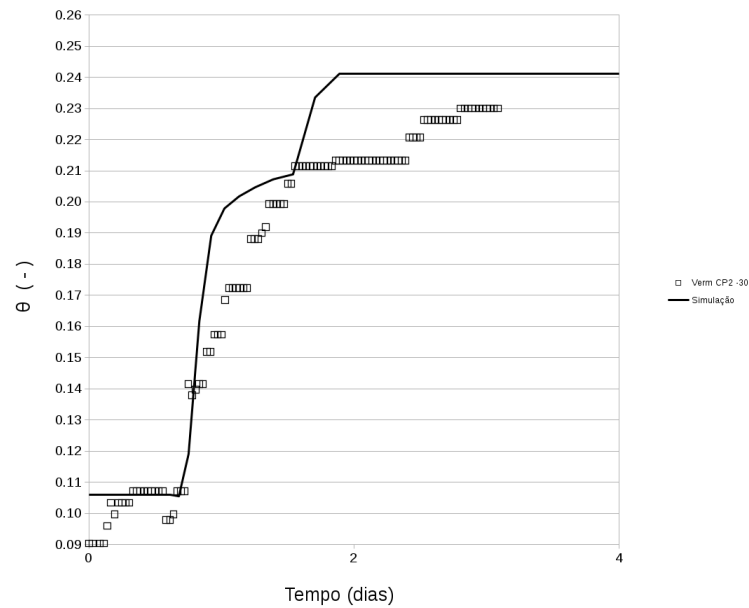
Conforme apresentado na seção 5.2.1 as curvas de condutividade hidráulica foram também calibradas para cada ensaio a partir dos resultados de umidade registrados pelo TDR da cota – 30 cm modificando os pontos estimados pelo método de van Genuchten (1980). Na Figuras 6.77 a 6.92 estão apresentados os resultados obtidos do avanço da frente de infiltração a partir das curvas calibradas e as respectivas curvas de condutividade hidráulica.

Figura 6.77: Solo Vermelho CP1 – Calibração da Curva de Condutividade Hidráulica a partir dos resultados do TDR -30 cm



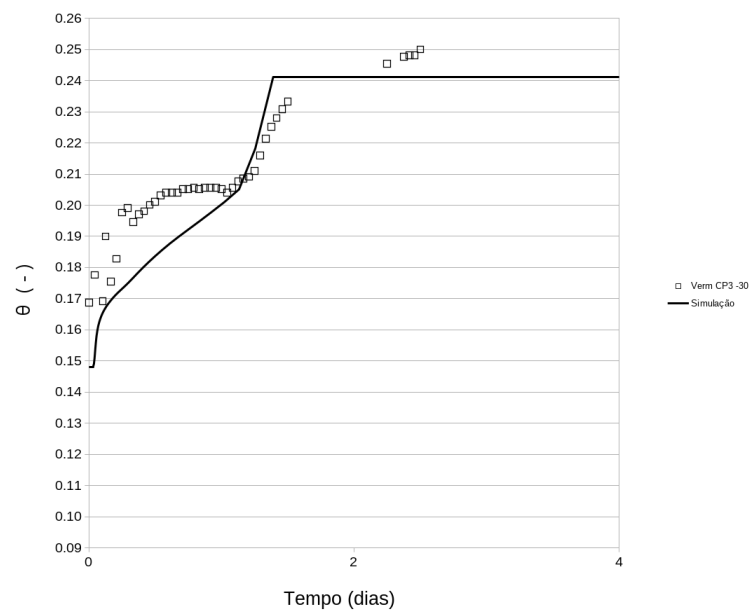
Fonte: O autor

Figura 6.78: Solo Vermelho CP2 – Calibração da Curva de Condutividade Hidráulica a partir dos resultados do TDR -30 cm



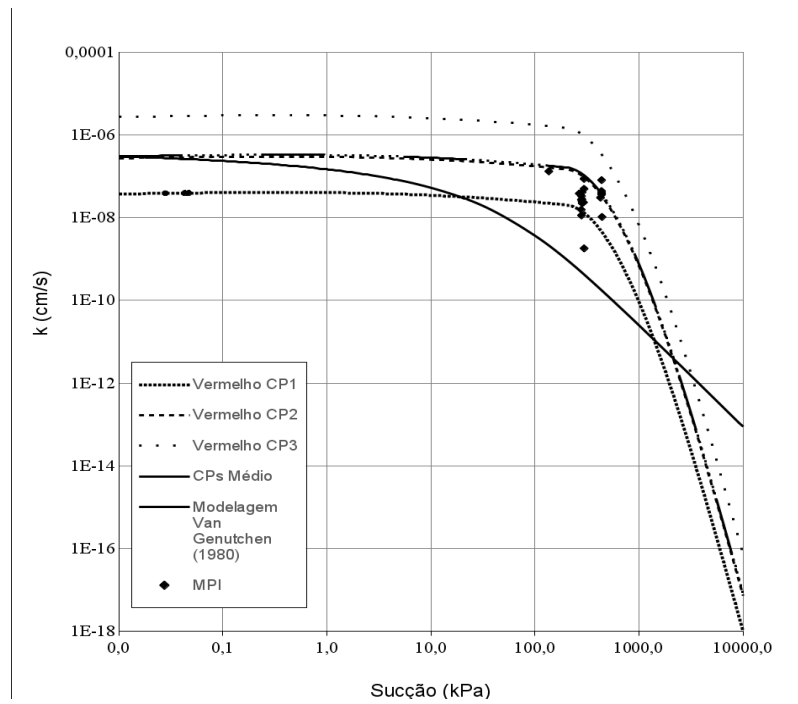
Fonte: O autor

Figura 6.79: Solo Vermelho CP3 – Calibração da Curva de Condutividade Hidráulica a partir dos resultados do TDR -30 cm



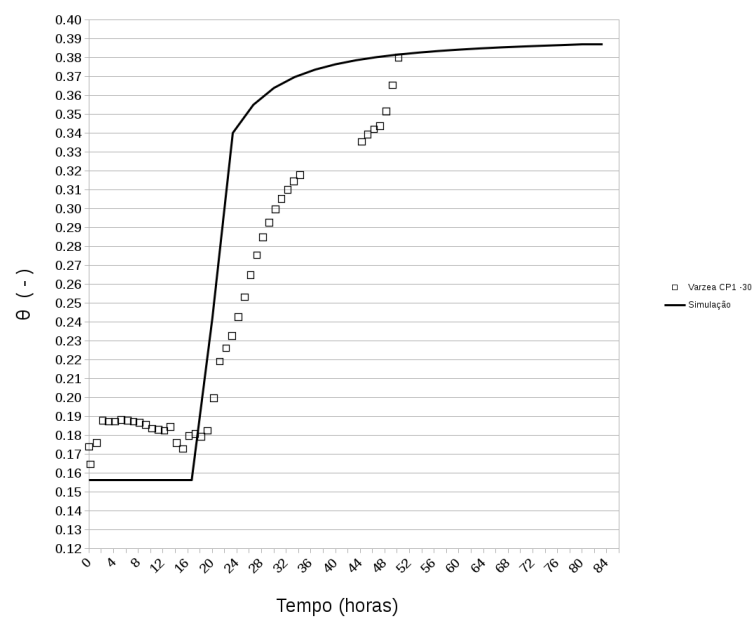
Fonte: O autor

Figura 6.80: Curvas de Condutividade Calibradas – Solo Vermelho



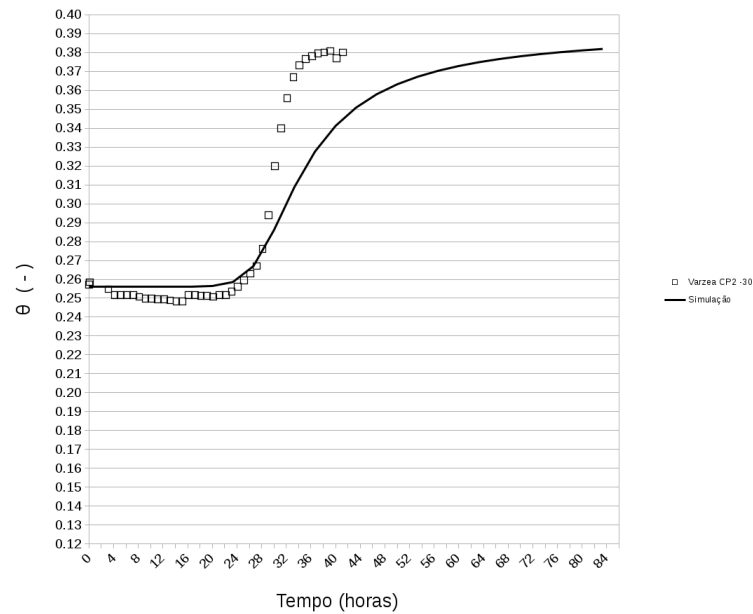
Fonte: O autor

Figura 6.81: Solo Várzea CP1 – Calibração da Curva de Condutividade Hidráulica a partir dos resultados do TDR -30 cm



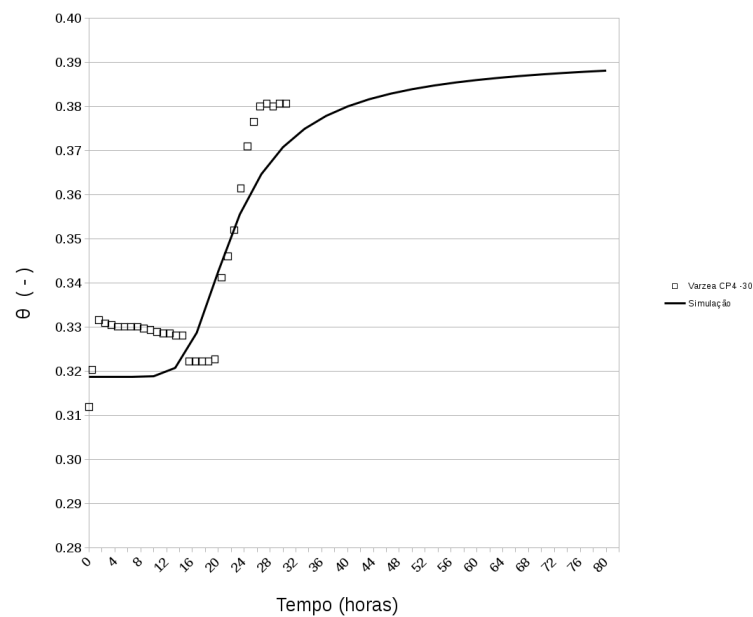
Fonte: O autor

Figura 6.82: Solo Várzea CP2 – Calibração da Curva de Condutividade Hidráulica a partir dos resultados do TDR -30 cm



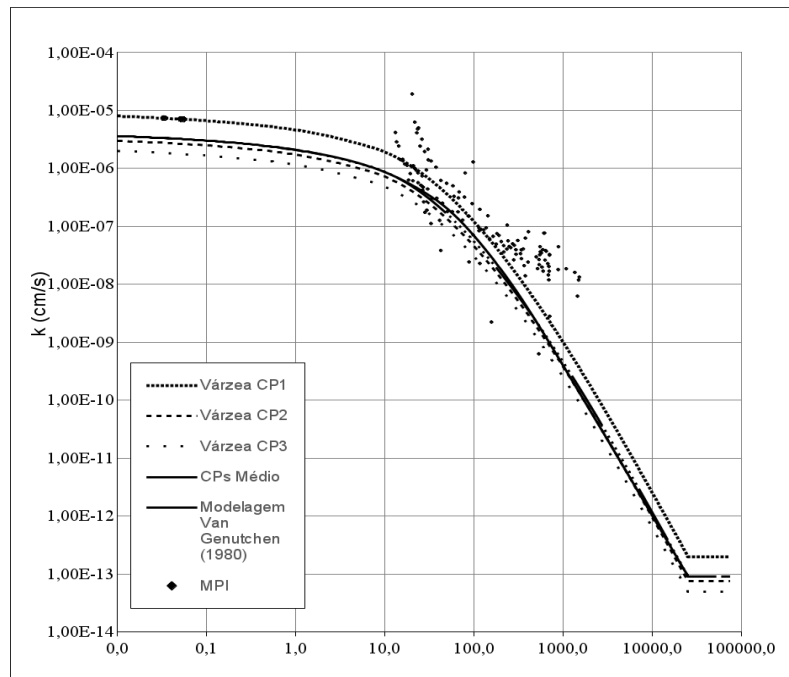
Fonte: O autor

Figura 6.83: Solo Várzea CP4 – Calibração da Curva de Condutividade Hidráulica a partir dos resultados do TDR -30 cm



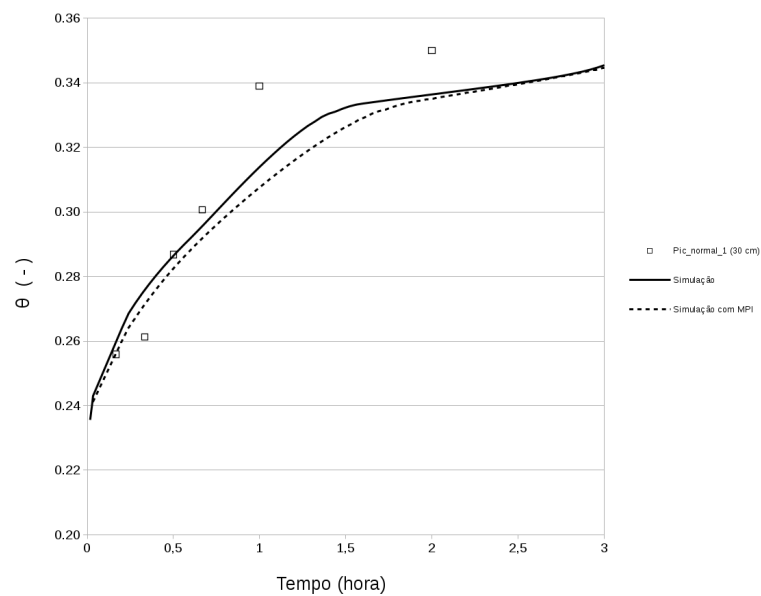
Fonte: O autor

Figura 6.84: Curvas de Condutividade Calibradas – Solo Várzea



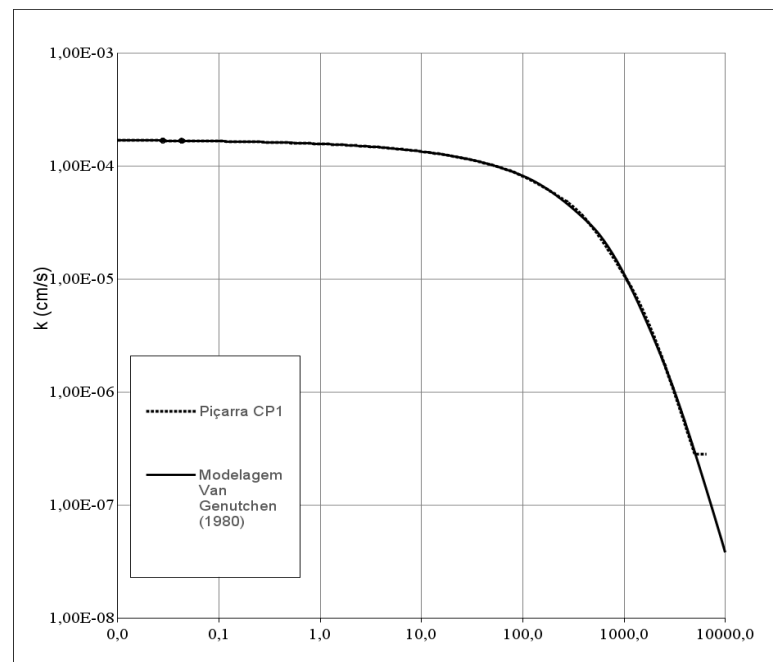
Fonte: O autor

Figura 6.85: Solo Piçarra CP1 – Calibração da Curva de Condutividade Hidráulica a partir dos resultados do TDR -30 cm



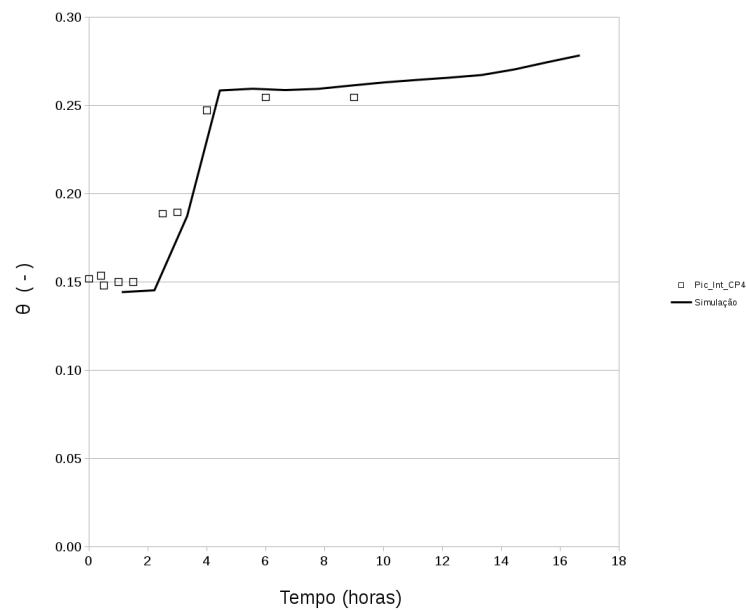
Fonte: O autor

Figura 6.86: Curvas de Condutividade Calibradas – Solo Piçarra P. Normal



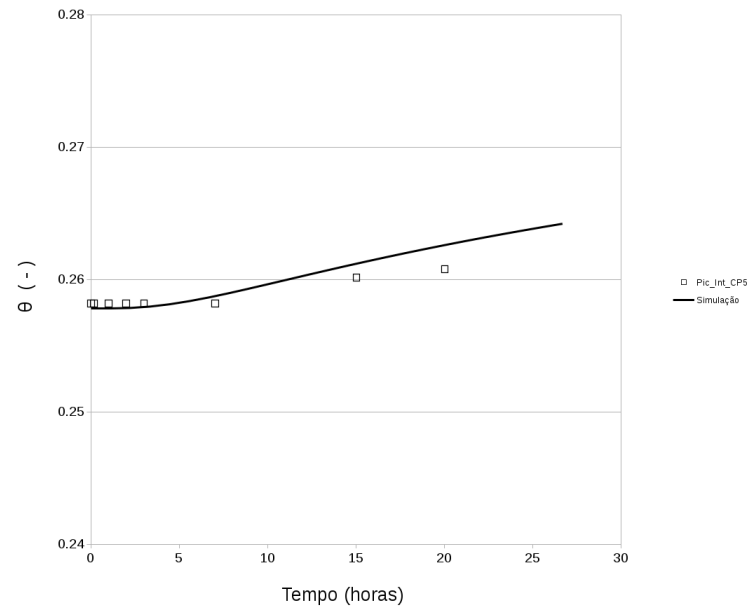
Fonte: O autor

Figura 6.87: Solo Piçarra CP4 – Calibração da Curva de Condutividade Hidráulica a partir dos resultados do TDR -30 cm



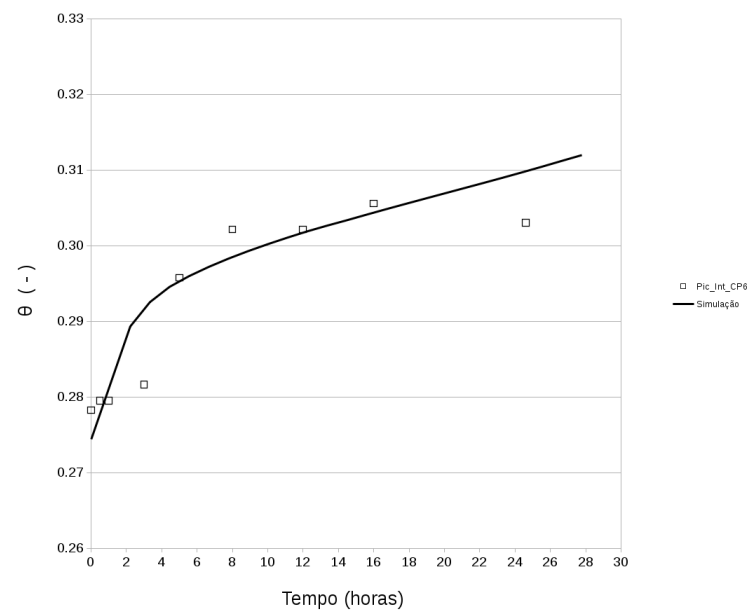
Fonte: O autor

Figura 6.88: Solo Piçarra CP5 – Calibração da Curva de Condutividade Hidráulica a partir dos resultados do TDR -30 cm



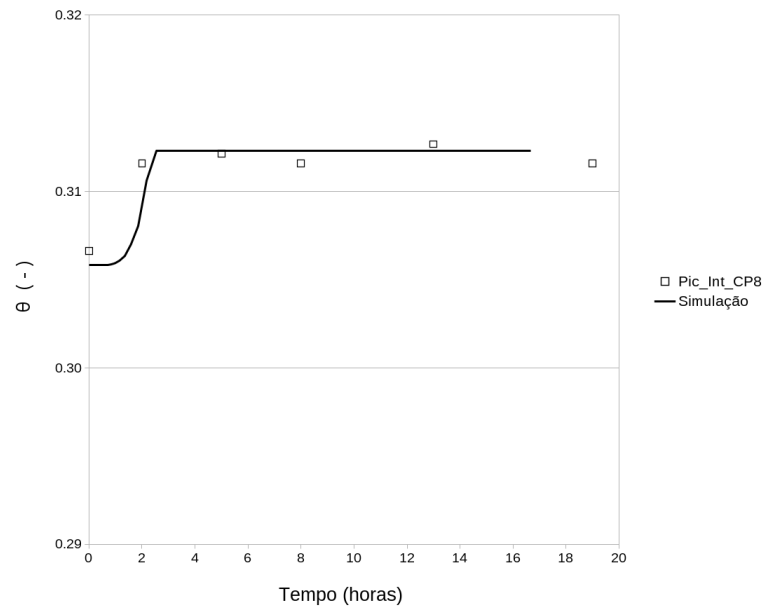
Fonte: O autor

Figura 6.89: Solo Piçarra CP6 – Calibração da Curva de Condutividade Hidráulica a partir dos resultados do TDR -30 cm



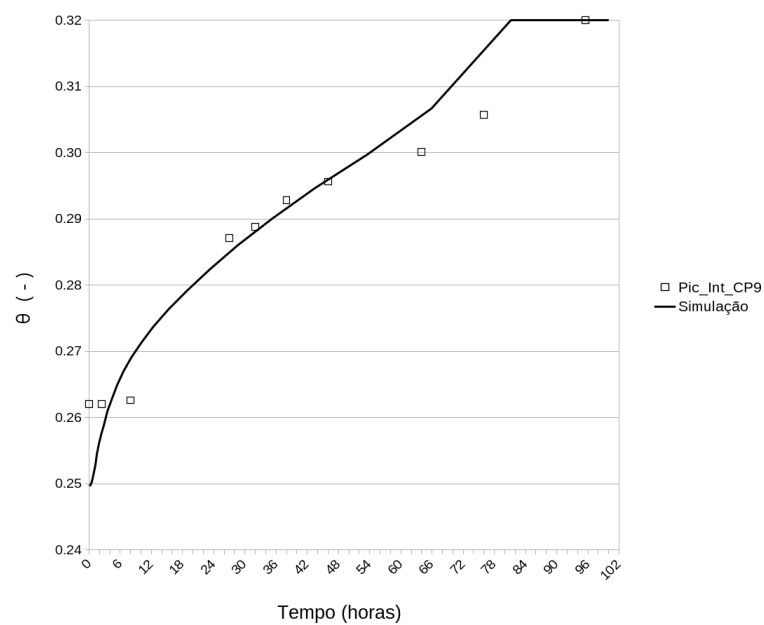
Fonte: O autor

Figura 6.90: Solo Piçarra CP8 – Calibração da Curva de Condutividade Hidráulica a partir dos resultados do TDR -30 cm



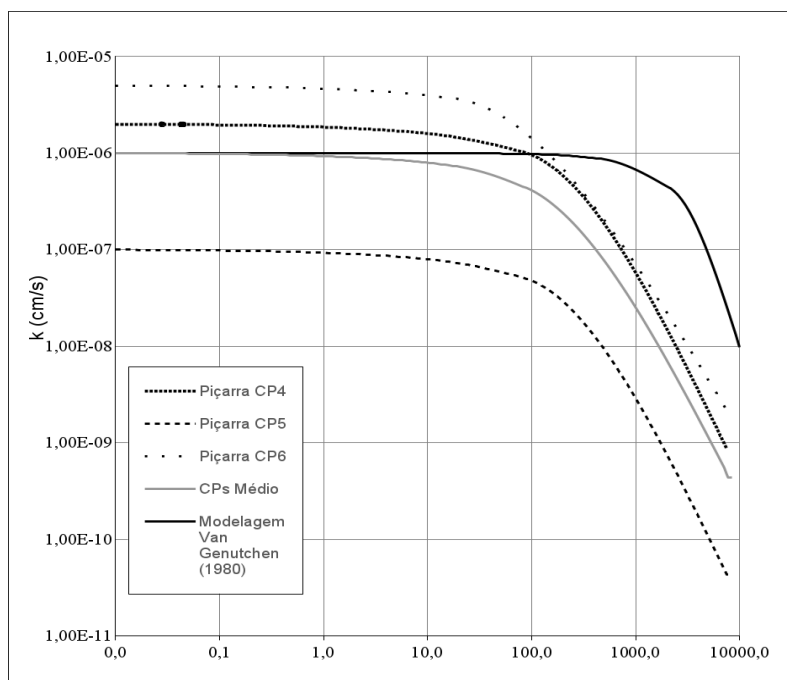
Fonte: O autor

Figura 6.91: Solo Piçarra CP9 – Calibração da Curva de Condutividade Hidráulica a partir dos resultados do TDR -30 cm



Fonte: O autor

Figura 6.92: Curvas de Condutividade Calibradas – Solo Piçarra P. Intermediário



Fonte: O autor

Como é possível verificar a partir das curvas de condutividade hidráulica, a modelagem da infiltração considerando a curva gerada aplicando o modelo de van Genuchten (1980) pode não coincidir com o comportamento verificado nos ensaios. Apenas os ensaios realizados com o solo várzea e o piçarra CP1 foram bem representados quando ocorreu a simulação considerando a curva de condutividade gerada pela equação de van Genuchten (1980). Para os ensaios realizados com o solo vermelho e para os ensaios realizados com os demais corpos de prova do solo piçarra, houve a necessidade de alterar o formato da curva de condutividade para conseguir representar o aumento da umidade na sonda FDR -30 ao longo do tempo.

Como era de se esperar, os valores obtidos pelo Método do Perfil Instantâneo coincidiram razoavelmente com a curva de condutividade calibrada, já que este método foi aplicado no próprio ensaio que foi simulado.

6.9.2. Simulações De Vazamentos Em Campo

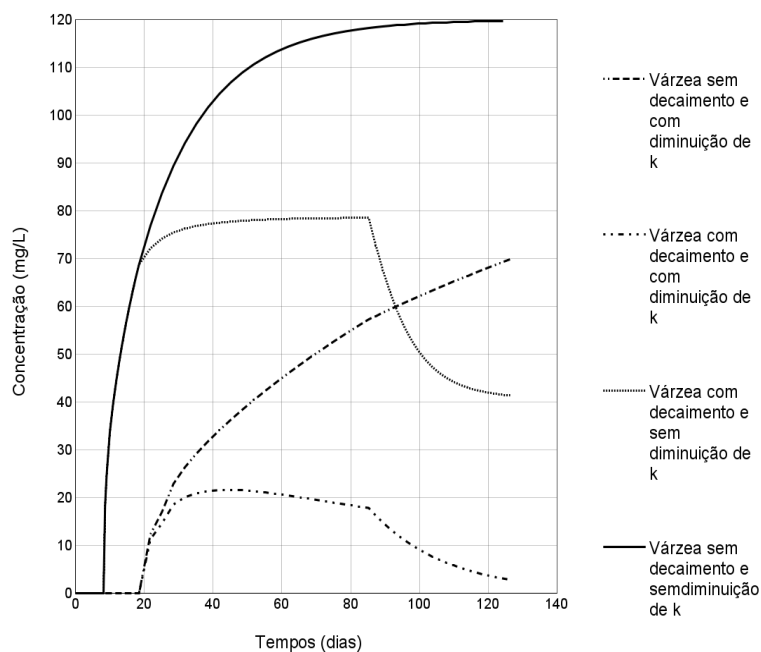
As simulações de vazamentos em campo foram realizadas conforme apresentado da Seção 5.2.2 A construção da bacia com o solo piçarra compactado na energia Proctor normal não foi simulada já que não atenderia aos requisitos da norma.

Solo Várzea

A seguir estão apresentados os gráficos de variação da umidade e da concentração de HTP em função do tempo, na cota $-1,00$ m, para uma bacia construída com o solo várzea. Como já foi apresentado, foram consideradas as seguintes variações de comportamento da percolação e migração dos contaminantes:

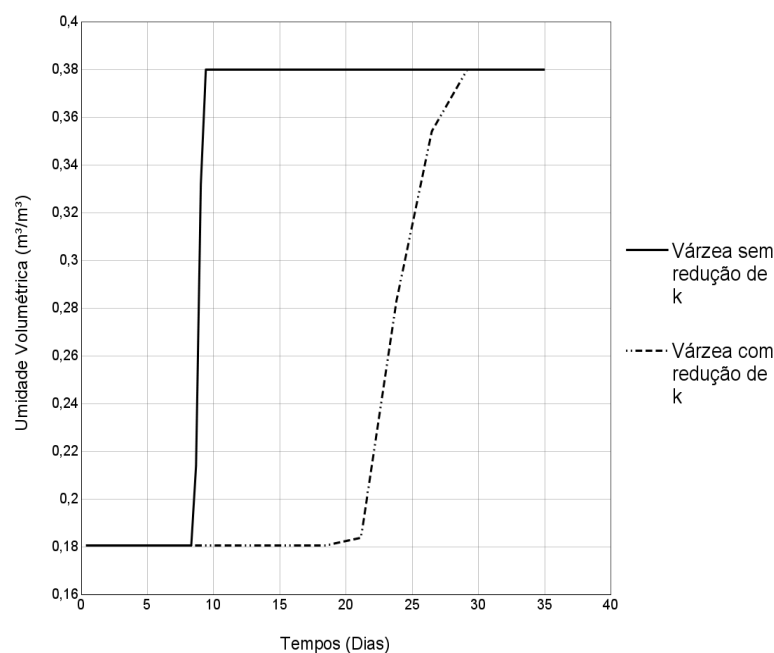
- Ausência de decaimento biológico ou redução de condutividade hidráulica.
- Ausência de decaimento biológico com redução de condutividade hidráulica.
- Presença de decaimento biológico sem redução de condutividade hidráulica.
- Presença de decaimento biológico com redução de condutividade hidráulica (comportamento registrado nos ensaios).

Figura 6.93: Gráfico Concentração x Tempo – Solo Várzea



Fonte: O autor

Figura 6.94: Gráfico Umidade x Tempo – Solo Várzea



Fonte: O autor

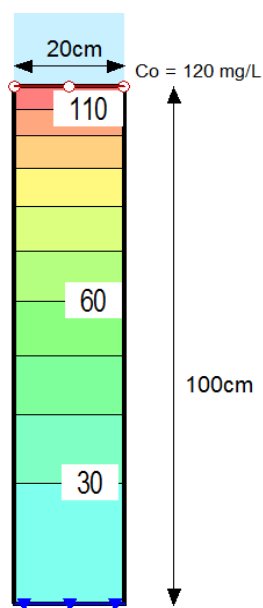
Em relação à chegada da frente de umedecimento ao fundo da camada de proteção, nota-se a partir da Figura 6.94 que a redução da condutividade hidráulica ao longo da percolação causaria um retardo de aproximadamente 13 dias no avanço da frente de umedecimento. O tempo necessário para a saturação da bacia de contenção seria de aproximadamente 28 dias em função deste fenômeno.

Analisando a migração de contaminantes, percebe-se que existe uma diferença de aproximadamente 13 dias na chegada da frente de contaminação, comparando as hipóteses sem redução e com redução de k , acompanhado o comportamento da frente de umedecimento. No que diz respeito ao crescimento da concentração de contaminante na base da camada de proteção, nota-se que apenas na hipótese “a” a concentração do contaminante alcançaria a concentração da fonte de contaminação no período de 120 dias após o derramamento. Considerando a hipótese “b”, a concentração aumentaria até aproximadamente 80 mg/L aos 95 dias e começaria a reduzir devido à biodegradação chegando aos 120 dias a uma concentração de aproximadamente 40 mg/L. Considerando a hipótese “c”, percebe-se um crescimento gradual da concentração, alcançando aos 120 dias o valor de 70 mg/L. Ao

considerar a hipótese “d”, onde ambos os fenômenos estariam ocorrendo, nota-se um pico de concentração de 20 mg/L ao 40 dias, reduzindo para quase 0 aos 120 dias.

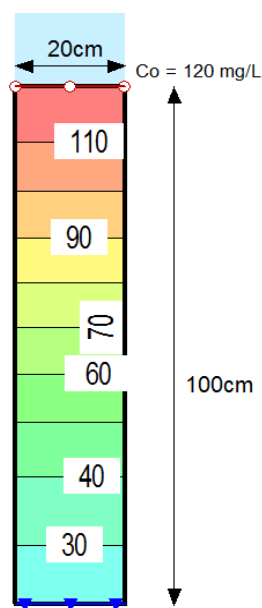
Nas Figuras 6.95 a 6.98 são apresentados os cortes transversais da bacia evidenciando o avanço da contaminação após aproximadamente 30 dias para cada hipótese considerada.

Figura 6.95: Corte transversal barragem com redução de k e com decaimento



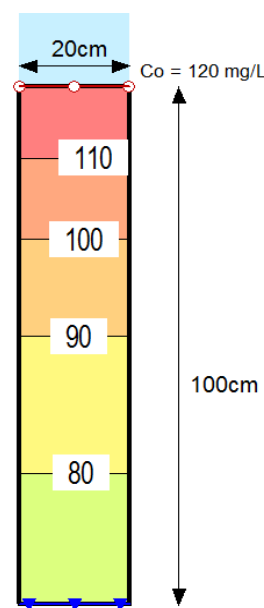
Fonte: O autor

Figura 6.96: Corte transversal barragem com redução de k e sem decaimento



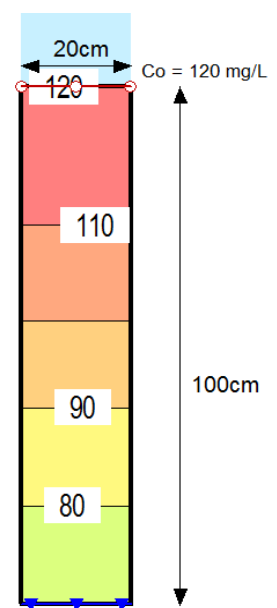
Fonte: O autor

Figura 6.97: Corte transversal barragem sem redução de k e com decaimento



Fonte: O autor

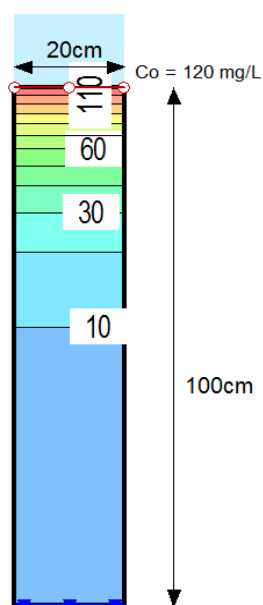
Figura 6.98: Corte transversal barragem sem redução de k e sem decaimento



Fonte: O autor

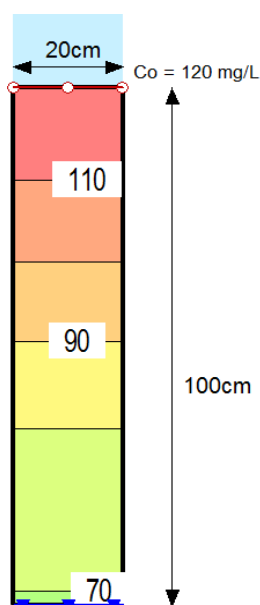
Nas Figuras 6.99 a 6.102 são apresentados os cortes transversais da bacia evidenciando o avanço da contaminação (em mg/L) após aproximadamente 120 dias para cada hipótese considerada.

Figura 6.99: Corte transversal barragem com redução de k e com decaimento



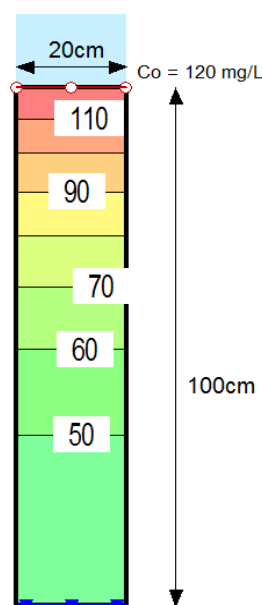
Fonte: O autor

Figura 6.100: Corte transversal barragem com redução de k e sem decaimento



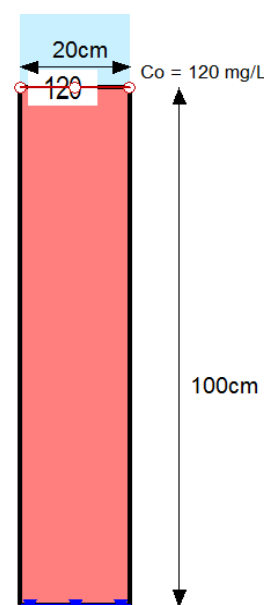
Fonte: O autor

Figura 6.101: Corte transversal barragem sem redução de k e com decaimento



Fonte: O autor

Figura 6.102: Corte transversal barragem sem redução de k e sem decaimento



Fonte: O autor

Na tabela 6.14 são apresentados os valores de fluido e de HTP percolados pela base da camada de proteção da bacia de contenção hipotética obtidos a partir da modelagem considerando 30 e 120 dias.

Tabela 6.14: Volume de fluido e de HTP percolados pela base da camada de proteção da Bacia (Várzea)

Hipótese	Total de Fluido Percolado após 30 dias (L/m ²)	Total de Fluido Percolado após 120 dias (L)	Total de HTP Depositado após 30 dias (mg/m ²)	Total de HTP Depositado após 120 dias (mg/m ²)
a	290	1452	23.308	157.327
b	290	1452	19.869	97.456
c	31	120	252	4.872
d	31	120	197	1.562

Fonte: O autor

Nota-se que a redução da condutividade hidráulica tem uma influência consideravelmente maior do que o decaimento biológico no que diz respeito à contenção da contaminação. Verifica-se também que há uma divergência muito grande entre os resultados obtidos considerando o comportamento real (hipótese “d”) visualizado no ensaio e o comportamento esperado inicialmente sem considerar redução de k ou decaimento (hipótese “a”).

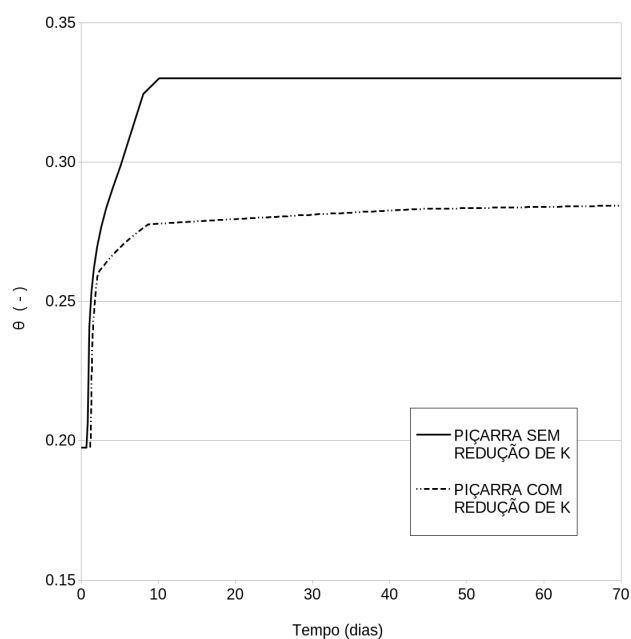
Para as modelagens considerando a construção da bacia com os solos piçarra e vermelho apenas foram consideradas as seguintes situações, já que não se detectou a ocorrência de decaimento biológico:

- a) Condutividade hidráulica constante.
- b) Redução de condutividade hidráulica.

Solo Piçarra

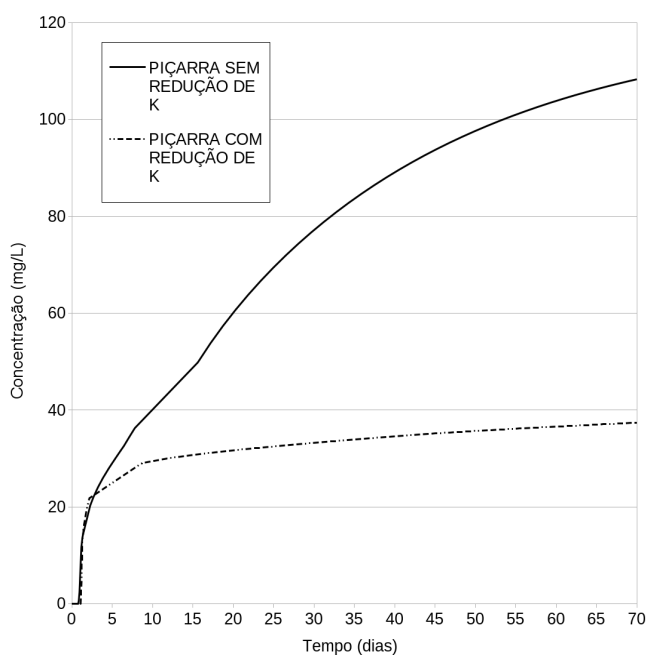
Nas Figuras 6.103 e 6.104 estão apresentadas respectivamente as curvas de variação da concentração e de umidade ao longo do tempo.

Figura 6.103: Gráfico Umidade x Tempo – Solo Piçarra



Fonte: O autor

Figura 6.104: Gráfico Concentração x Tempo – Solo Piçarra



Fonte: O autor

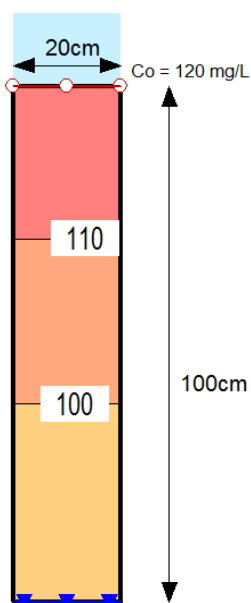
Analisando a Figura 6.103 nota-se que a chegada da frente de umedecimento à base da camada de proteção da bacia acontece aproximadamente no mesmo instante considerando as duas hipóteses. Tal resultado é consequência da forma da curva de condutividade hidráulica, onde para as sucções iniciais o solo piçarra assume um k maior que para os outros solos, antecipando a chegada da frente de umedecimento

Com o desenvolvimento da percolação, nota-se que no caso da hipótese b, a brusca redução da condutividade hidráulica estabiliza a umidade na base da camada de proteção em aproximadamente 28%.

Analisando a migração de contaminantes, percebe-se que a frente de contaminação também chegaria aproximadamente no mesmo instante acompanhado o comportamento da frente de umedecimento. No que diz respeito ao crescimento da concentração de contaminante na base da camada de proteção, nota-se que apenas na hipótese “a” a concentração do contaminante alcançaria a concentração da fonte de contaminação após 120 dias. Considerando a hipótese “b”, a concentração aumentaria até aproximadamente 40 mg/L aos 70 dias assumindo um comportamento praticamente assintótico. Nas Figuras 6.105 e 6.106 são apresentados os cortes transversais da bacia evidenciando o avanço da contaminação após

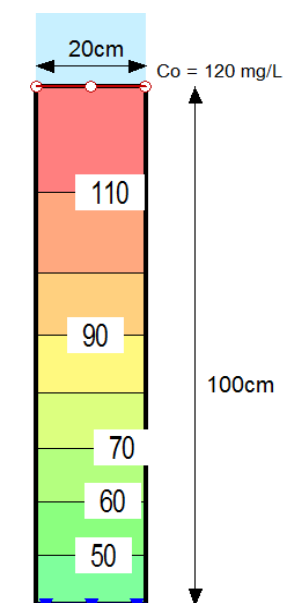
aproximadamente 30 dias do derramamento, respectivamente sem redução e com redução de k .

Figura 6.105: Corte transversal barragem sem redução de k (Piçarra)



Fonte: O autor

Figura 6.106: Corte transversal barragem com redução de k (Piçarra)



Fonte: O autor

Na tabela 6.15 são apresentados os valores de fluido e de HTP percolados pela base da camada de proteção da bacia de contenção hipotética obtidos a partir da modelagem considerando 30 e 120 dias.

Tabela 6.15: Volume de fluido e de HTP percolados pela base da camada de proteção da Bacia (Piçarra)

Hipótese	Total de Fluido Percolado após 30 dias (L/m ²)	Total de Fluido Percolado após 120 dias (L/m ²)	Total de HTP Depositado após 30 dias (mg/m ²)	Total de HTP Depositado após 120 dias (mg/m ²)
a	58	327	4505	30430
b	0	0	0	0

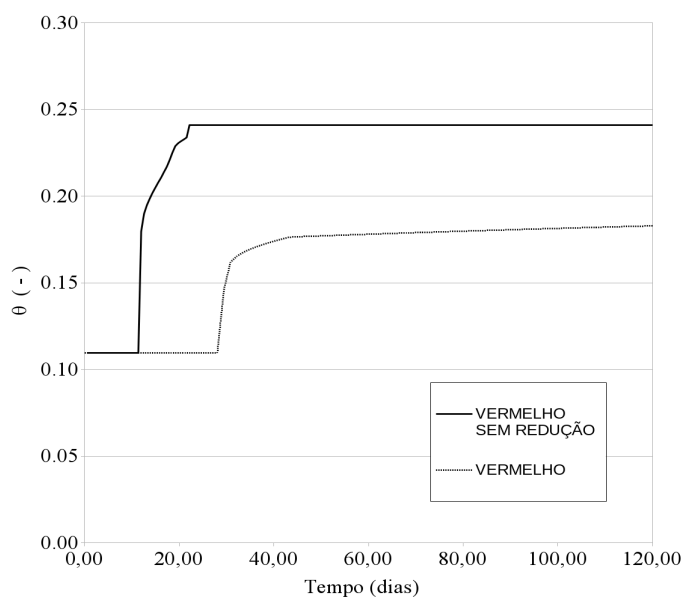
Fonte: O autor

No solo piçarra, assim como no solo várzea, verifica-se que há uma divergência muito grande entre os resultados obtidos considerando as duas hipóteses. Neste caso, contudo, a redução de k foi tão acentuada que após 120 dias não haveria a contaminação de camadas abaixo da bacia, ou seja, todo o volume infiltrado permaneceu na camada de solo compactado, apenas aumentando a sua umidade.

Solo Vermelho

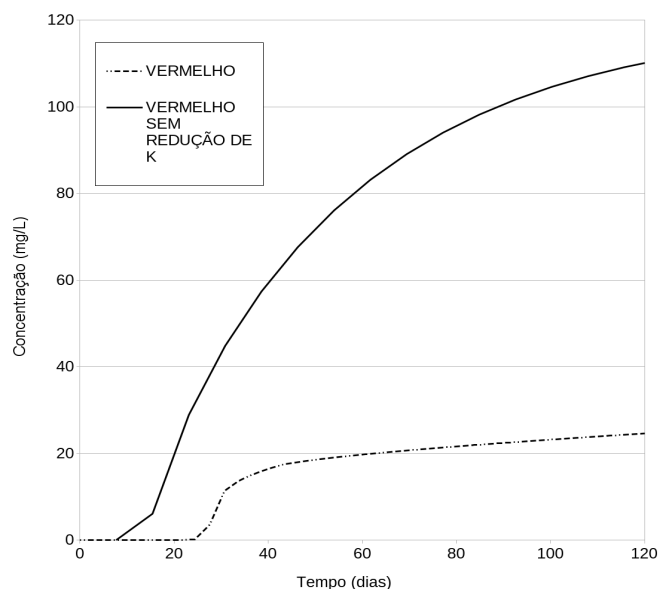
Nas Figuras 6.107 e 6.108 estão apresentadas respectivamente as curvas de variação da umidade e concentração ao longo do tempo na base da camada de proteção da bacia (cota - 1,00 m).

Figura 6.107: Gráfico Umidade x Tempo – Solo Vermelho



Fonte: O autor

Figura 6.108: Gráfico Concentração x Tempo – Solo Vermelho



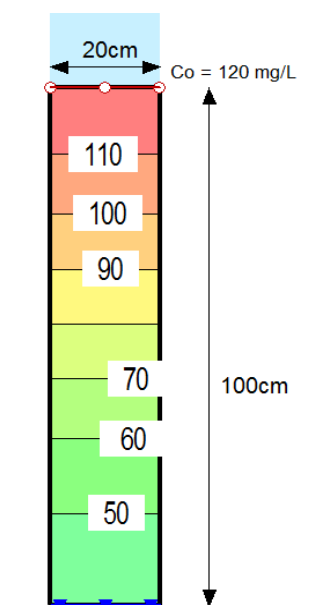
Fonte: O autor

Em relação à chegada da frente de umedecimento à base da camada de proteção da bacia, nota-se a partir da Figura 6.107 que a redução da condutividade hidráulica ao longo da percolação causaria um retardo de aproximadamente 20 dias na chegada da frente de umedecimento. Semelhante ao que ocorreria com o solo piçarra, devido à grande redução da condutividade hidráulica, ocorre uma estabilização da umidade com um θ de aproximadamente 18%.

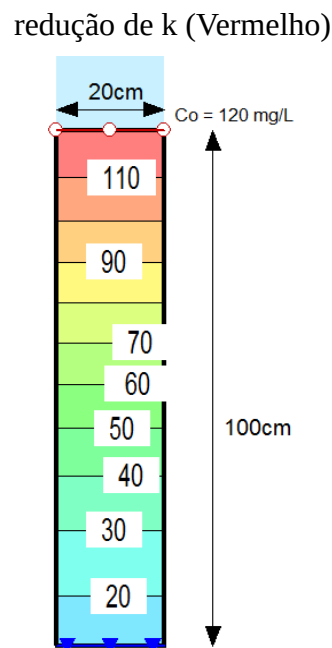
Analisando a migração de contaminantes, percebe-se que existe uma diferença de aproximadamente 15 dias na chegada da frente de contaminação, comparando as hipóteses sem redução e com redução de k . No que diz respeito ao crescimento da concentração de contaminante na base da camada de proteção, nota-se que apenas na hipótese “a” a concentração do contaminante alcançaria a concentração de 110 mg/L após 120 dias. Considerando a hipótese “b”, a concentração aumentaria até aproximadamente 24 mg/L aos 120 dias.

Nas Figuras 6.109 e 6.110 são apresentados os cortes transversais da bacia evidenciando o avanço da contaminação após aproximadamente 30 dias do derramamento, respectivamente sem redução e com redução de k .

Figura 6.109: Corte transversal barragem sem redução de k (Vermelho) Figura 6.110: Corte transversal barragem com redução de k (Vermelho)



Fonte: O autor



Fonte: O autor

Na tabela 6.16 são apresentados os valores de fluido e de HTP percolados pela base da camada de proteção da bacia de contenção hipotética obtidos a partir da modelagem considerando 30 e 120 dias.

Tabela 6.16: Volume de fluido e de HTP percolados pela base da camada de proteção da Bacia (Vermelho)

Hipótese	Total de Fluido Percolado após 30 dias (L/m ²)	Total de Fluido Percolado após 120 dias (L)	Total de HTP Depositado após 30 dias (mg/m ²)	Total de HTP Depositado após 120 dias (mg/m ²)
a	18	205	885	19014
b	0	0	0	0

Fonte: O autor

Comparação entre os 3 solos

Comparando os resultados obtidos considerando as hipóteses observadas nos ensaios de coluna, nota-se que, nas condições de compactação adotadas, os solos vermelho e piçarra

seriam os solos mais indicados para a construção das bacias de contenção. Na tabela são apresentados os resultados a efeito de comparação. No solo várzea, contudo, a presença de organismos com a capacidade de decompor os constituintes da água de produção, torna o seu uso também atrativo, até porque o tempo para a chegada da frente de contaminação à base da camada de proteção foi de cerca de 20 dias (mais que suficiente para a tomada de decisões por parte da empresa) e os valores de concentração de HTP tendem a praticamente zero no longo prazo (a partir do 80º dia). Também é importante destacar, que a energia de compactação empregada no solo várzea foi a menor dos três solos considerados na modelagem, Proctor Normal. Deste modo o aumento da energia de compactação poderia reduzir a condutividade hidráulica inicial, o que implicaria, talvez, em um fenômeno parecido com o que ocorreu nos demais solo, porém, agregando a biodegradação.

Tabela 6.17: Volume de fluido e de HTP percolados pela base da camada de proteção da Bacia (Vermelho)

Solo	Total de Fluido Percolado após 30 dias (L/m ²)	Total de Fluido Percolado após 120 dias (L/m ²)	Total de HTP Depositado após 30 dias (mg/m ²)	Total de HTP Depositado após 120 dias (mg/m ²)
Várzea	18	205	885	19014
Piçarra	0	0	0	0
Vermelho	0	0	0	0

Fonte: O autor

Nas modelagens realizadas considerando os parâmetros destes solos, a grande redução da condutividade hidráulica faz com que, no decorrer do processo de infiltração e antes que a frente de contaminação atinja o fundo da camada de proteção, o solo se torne praticamente impermeável, garantindo a estanqueidade do sistema.

7. CONCLUSÕES

7.1. Ensaio de Coluna Monitorada

O ensaio de coluna monitorada permitiu, além das definição dos parâmetros de migração de contaminante, a obtenção de parâmetros hidráulicos do solo em condições saturada e não saturada.

A definição dos parâmetros do solo não saturado, condutividade hidráulica e curva de retenção, a partir da umidade inicial da amostras pode limitar a faixa de sucção das curvas de condutividade hidráulica e de retenção obtidas.

A condutividade hidráulica saturada inicial dos ensaios de coluna foi coerente com os valores obtidos dos ensaios de permeabilidade. Além disso, os valores de k foram monitorados ao longo do tempo, permitindo o acompanhamento de seu comportamento ao longo do ensaio (redução de k). O ensaio de coluna monitorada, permitiu relacionar a variação da condutividade hidráulica com a variação das concentrações de HTP e de cátions dissolvidos no fluido coletado, permitindo o entendimento dos fenômenos causadores da redução de k .

A grande diferença da condutividade hidráulica saturada entre o solo piçarra compactado na energia Proctor Normal e este mesmo solo compactado nas demais energias indica que o fluxo na matriz porosa é regulado pelos microporos a partir do momento em que a continuidade dos macroporos cessa. O aumento da energia de compactação, além de diminuir o volume dos macroporos, interrompe a continuidade destes fazendo com que o fluxo seja direcionado para os microporos. A não ocorrência de expulsão de Mg e Al no ensaio Piçarra CP1 compactado na energia Proctor Normal reforça a hipótese de que o fluxo preferencial neste ensaio não estaria ocorrendo nos microporos.

7.2. Modelagem da Migração de Contaminantes

A modelagem da migração de contaminantes foi possível de ser realizada em 7 dos 13 ensaios.

A partir da derivação das soluções analíticas e posterior integração por diferenças finitas foi possível alcançar resultados coerentes na modelagem da curva de chegada mesmo com a variação da condutividade hidráulica ao longo do tempo.

A melhor adequação das curvas com os resultados experimentais se deu considerando um valor de D_h constante, sugerindo que, à medida que a condutividade hidráulica diminui, ocorre também uma variação na estrutura do meio poroso. A variação na estrutura estaria relacionada com a diminuição dos poros por diversos fenômenos que podem acontecer simultaneamente (obstrução biológica, dispersão da argila, filtração dos orgânicos). A diminuição dos poros causaria um aumento da tortuosidade do meio poroso, e conseqüentemente, da dispersão hidrodinâmica do soluto a medida que a velocidade de percolação diminui.

Na modelagem do solo várzea, a qual apresentou indícios de decaimento biológico, a incapacidade de elaborar a curva de chegada a partir das formulações existentes implicou na proposta de um modelo que considera a variação da constante de decaimento ao longo do tempo. A utilização deste modelo permitiu o traçado da curva de chegada acompanhando os pontos experimentais dos três ensaios realizados. De acordo com este modelo proposto, o crescimento de uma colônia de micro-organismos depende da concentração de nutriente disponível e do tempo de contato da colônia com este nutriente.

7.3. Redução de Condutividade Hidráulica em Solos Areno-argilosos

A redução da permeabilidade ao longo da percolação da água de produção do petróleo por corpos de prova de solos areno-argilosos compactados se manifestou como um fenômeno frequente (12 de 13 experimentos).

7.3.1. Redução De Condutividade Por Dispersão Da Argila

De acordo com as análises efetuadas, a dispersão da fração argila é um dos principais mecanismos de redução da permeabilidade do solo durante os ensaios de percolação do fluido de produção. As hipóteses de redução de permeabilidade por dispersão da argila apresentaram fortes indícios de ocorrência.

Provavelmente, a dispersão das argilas é proporcional ao percentual de ocorrência de argilominerais e à relação entre concentração de sódio e os cátions bivalente (SAR) e inversamente proporcional à salinidade do fluido de percolação.

A dispersão das argilas está relacionada com a ocorrência de fluxo nos microporos do solo, o que explica a não redução da condutividade hidráulica quando o k inicial é alto.

O entendimento do comportamento dos solos areno-argilosos quando percolados por águas com altas concentrações de sódio pode propiciar dimensionamentos de obras mais econômicas a partir da escolha correta do material bem como as condições de compactação.

7.3.2. Redução De Condutividade Por Filtração Dos Orgânicos

Neste trabalho, a hipótese de redução de condutividade por filtração dos orgânicos foi verificada a partir da comparação da distribuição de poros do solo com a variação do conteúdo de matéria orgânica (STV) antes e após os ensaios.

A obstrução dos poros por filtração dos orgânicos está contudo condicionada a ocorrência de poros na matriz porosa com diâmetro igual ou menor ao diâmetro das partículas orgânicas dissolvidas.

7.3.3. Redução De Condutividade Por Atividade Microbiana

Apesar de constatada a existência de atividade microbiana e decaimento biológico, analisando o comportamento da redução de condutividade hidráulica e o comportamento da curva de chegada modelada, foi possível concluir que nas condições de ensaio a obstrução por atividade microbiana não teria grande influência na redução de k .

7.4. Modelagem Numérica de Vazamento em Campo

A modelagem de um vazamento em campo foi possível utilizando os aplicativos computacionais empregados, a partir dos dados obtidos no ensaio de coluna monitorada. Ainda que estes aplicativos tenham alguma limitação em relação aos modelos propostos, a divisão da infiltração em etapas permitiu variar os parâmetros hidráulicos e de migração de contaminantes, viabilizando a modelagem do fenômeno de acordo com o que foi desenvolvido neste trabalho.

A partir dos resultados obtidos através da modelagem numérica, é possível concluir que os solos utilizados possuem alto desempenho de contenção dos contaminantes da água de produção do petróleo. Os solos vermelho, compactado na energia Proctor Modificado, e

piçarra, compactado na energia Proctor Intermediário e $E = 9 \text{ kgf.cm/cm}^3$, proporcionariam a construção de bacias capazes de, ao longo da percolação, converter-se em camadas quase impermeáveis, impedindo qualquer chegada de contaminantes. O solo várzea, compactado na energia Proctor Normal, apresentou propriedades hidráulicas menos interessantes que os demais solos. Por outro lado, a possibilidade de redução dos vazios da matriz porosa com o aumento da energia de compactação junto à ocorrência de biodegradação dos hidrocarbonetos tornam este solo um material bastante interessante na construção de bacias de contenção.

8. REFERÊNCIAS

- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 17505-2: Armazenagem de líquidos inflamáveis e combustíveis. Parte 2: Armazenamento em tanques e em vasos. Agosto de 2006.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13292: solo – determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares a carga constante, CB-02, Rio de Janeiro, 1995, 8 p.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 14545: Solo: determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável. Rio de Janeiro, 2000.
- ABU-SHARAR, T.; F.T. BINGHAM; J.D. RHODES (1987). Reduction in Hydraulic Conductivity in Relation to Clay Dispersion and Disaggregation. Soil Science Society of America Journal
- AGAB, A.F. (2005). Hydraulic and Thermal Conductivities of Soils. University of Newcastle. pp.190.
- ALMEIDA, A. F. Avaliação de materiais argilosos da Formação Corumbataí para uso em liners compactados (CCL). 2015. 162 p. Dissertação de Mestrado (Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.
- ALEXANDER M., SCOW K.M. (1989). Kinetics of biodegradation in soil. In: Sawney B.L., Brown K., Eds, Reactions and Movement of Organic Chemicals in Soil. American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin, pp. 243-269
- ARVIDSSON, J., 1997. Soil compaction in agriculture—from soil stress to plant stress. PhD thesis, Agraria 41. Swedish Univ. of Agric. Sciences, Uppsala.
- ATLAS RM. HAZEN TC. Oil biodegradation and bioremediation: a tale of the two worst spills in U.S. history. Env Sci Technol. 2011;45:6709–6715.
- AUBERTIN, M., RICARD, J.-F., AND CHAPUIS, R.P. 1998. A predictive model for the water retention curve: application to tailings from hard-rock mines, Canadian Geotechnical Journal, 35: 55-69
- AZARI, M. AND LEIMKUEHLER, J. M. 1990. Formation Permeability Damage Induced by Completion Brines. J of Pet Technol 42 (04): 486-92. SPE-17149-PA
- BAKKE, T.; KLUNGSØYR, J.; SANNTI, S. 2013. Environmental impacts of produced water and drilling waste discharges from the Norwegian offshore petroleum industry. Marine Environmental Research, 92: pp. 154-169.

BÆLUM J, BORGLIN S, CHAKRABORTY R, FORTNEY J.L., LAMENDELLA R, MASON O.U., *et al.* Deep-sea bacteria enriched by oil and dispersant from the Deepwater Horizon spill. *Environ Microbiol.* 2012;14:2405–2416.

BARBOUR, S. L. - 19th Can. Geotech. Colloq.: The soil-water characteristic curve: a historical perspective. *Can. Geotech. J.* 35: 873-894, 1998.

BASSO, J. Transporte e retenção de K⁺, Cu²⁺ e Cl⁻ em uma mistura compactada de solos lateríticos para uso em barreiras selantes: procedimentos de homogeneização da mistura e adaptações em equipamento de percolação em coluna. Dissertação (mestrado em Geotecnia), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2003.

BEAR, J. *Dynamics of Fluids in Porous Media.* New York, American Elsevier. 1972.

BOSCOV, M. E. G. (1997). Contribuição ao Projeto de Sistemas de Contenção de Resíduos Perigosos Utilizando Solos Lateríticos. Tese de Doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 269p.

BRASIL, MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. CONAMA °420. Resolução 420, de 28 de dezembro de 2009.

BUCKINGHAM, E. Studies on the movement of soil moisture. U. S. Dept. of Agr. Bur. of de Soils, Bull. 38, 1907.

CARDOSO, F.B.F. (1995). Análise Química, Mineralógica e Micromorfológica de Solos Tropicais Colapsíveis e o Estudo da Dinâmica do Colapso. Dissertação de Mestrado em Geotecnia, Universidade de Brasília, 139 pp.

CARDOSO, L. S. P. Estudo do transporte de poluentes imiscíveis em solos. Tese Doutorado UFBA, Salvador-BA, 2011.

CARVALHO, Z. S.; MACHADO, S.L ; CARVALHO, M. F ; MATIZ, D. F. . Avaliação de barreiras minerais com solo compactado para contenção de líquidos orgânicos. In: 5º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental, 2015, Bento Gonçalves. Anais do Congresso, 2015. v. único.

CETESB. Relatório de qualidade das águas interiores no Estado de São Paulo 2005. São Paulo: CETESB, 2006.

CHEN, W.; PENG, J.; SU, Y.; ZHENG, L.; WANG, L.; JIANG, Z. Separation of oil/water emulsion using Pluronic F127 modified polyethersulfone ultrafiltration membranes *Sep. Purif. Technol.*, 66 (2009), pp. 591-597

CUNNINGHAM, A. B., W. G. CHARACKLIS, F. ABEDEEN, AND D. CRAWFORD, 1991. Influence of Biofilm Accumulation on Porous Media Hydrodynamics. *Environmental Science and Technology*, Vol. 25, P. 1305-1311.

CURTIN, D., STEPPUHN, H. AND SELLES, F. 1994. Clay dispersion in relation to sodicity, electrolyte concentration and mechanical effects. *Soil Sci. Soc. Am. J.* In Press.

DANIEL, D. E.; BENSON C. H., "Water Content-Density Criteria for Compacted Soil Liners," *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 116, No. 12, 1990, pp.

DAWIDOWSKI, J.B., KOOLEN, A.J., 1987. Changes of soil water suction, conductivity and dry strength during deformation of wet undisturbed samples. *Soil Tillage Res.* 9, 169 – 180.

DEBICKI, R., GLINSKI, J., LIPIEC, J., PUKOS, A., TURSKI, R., 1993. Soil strength, stability and structural state of Orthic Luvisols under different land use. *Int. Agrophys.* 7, 155 – 161.

DECAGON DEVICES (2017) - MPS-2 e MPS-6 Dielectric Water Potential Sensors Operator's Manual. Pullman

DECAGON DEVICES (2010) - 5TM Water Content and Temperature Sensors Operator's Manual. Pullman

DECAGON DEVICES (2018) - 5WP4C Dew Point PotentiaMeter Operator's Manual. Pullman

DE CAMPOS, T. M. P. ; DELGADO, C. C. ; TIBANA, S. ; AGUILLAR, S. S. ; FONSECA, E. C. . Determinação da Curva Característica de Sucção em Laboratório. In: 1a. Conferência Brasileira sobre Encostas, 1992, Rio de Janeiro. 1a. COBRAE. Rio de Janeiro: Imprinta Gráfica e Editora, 1992. v. 3. p. 835-851.

DIAS, C. O. (2012) Determinação da condutividade hidráulica de solos não saturados Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Construção Civil.. – Curitiba, 2012.

DOMENICO, P. A. & SCHWARTZ, F. W. – Physical and Chemical Hydrogeology. John Wiley & Sons, Inc., Singapore. 1990.

DOMENICO, P.A. & SCHWARTZ, F.W. Physical and Chemical Hydrogeology. Ed, 2nd, John Wiley and Sons. Inc, New York, NY, USA, 506, p. 1998.

EHLERS, W., 1975. Observations on earthworm channels and infiltration on tilled and untilled loess soil. *Soil Sci.* 119, 242 – 249

ELKINS, P.; VANNER, R.; FIREBRACE, J. 2005. Management of produced water on offshore oil installations: A comparative assessment using flow analysis.

FAKHRU'L-RAZI, A., ALIREZA, P., LUQMAN, C.A., DAYANG, R.A.B., SAYED, S.M., ZURINA, Z.A., 2009. Review of technologies for oil and gas produced water treatment.

FARAG, A.M. & HARPER, D.D. 2014. A review of environmental impacts of salts from produced water on aquatic resources. *International Journal of Coal Geology*, 126: pp. 157-161.

FERREIRA, A. M. Avaliação de Proposições Matemáticas para Interpretação do Comportamento de Solos Residuais Não Saturados. Rio de Janeiro, 2010.

FERRERO, A., LIPIEC, J., TURSKI, M., NOSALEWICZ, A., 2007. Stability and sorptivity of soil aggregates in grassed and cultivated sloping vineyards. *Polish J. Soil Sci.* XL (1), 1–8

FELHENDLER, R., SHAINBERG, I. AND FRENKEL, H., 1974. Dispersion and hydraulic conductivity of soils in mixed solution. *Trans. 10th Int. Congr. Soil Sci. (Moscow)*, 1: 103-112.

FEUERHARMEL, C. Aspectos do Comportamento Não Saturado de Dois Solos Coluvionares – Gasoduto Bolívia-Brasil. 2003. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

FITZPATRICK, F.A., JOHNSON, R., ZHU, Z., WATERMAN, D., MCCULLOCH, R.D., HAYTER, E.J., GARCIA, M.H., BOUFADEL, M., DEKKER, T., HASSAN, J.S., SOONG, D.T., HOARD, C.J. & LEE, K. Integrated modeling approach for fate and transport of submerged oil and oilparticle aggregates in a freshwater riverine environment. *Proceedings of the 10th Federal Interagency Sedimentation Conference*, Reno, NV (2015).

FOSTER, M. D. (1955) Relation between composition and swelling in clays: *Clays and Clay Minerals*, Prec. 3rd Conf., Natl. Acad. Sci.--Natl. Res. Council Pub. 395, pp. 205-220.

FREDLUND, D.G.; RAHARDJO, H. *Soil mechanics for unsaturated soils*. New York: John Wiley and Sons, INC., 1993.

FREDLUND, D.G., AND XING, A. 1994. Equations for the soil-water characteristic curve. *Canadian Geotechnical Journal*, 31(4) : 521-532.

FREEZE, R. A.; CHERRY, J. A. *Groundwater*. Englewood Cliff: Prentice-Hall, 1979.

FRENKEL, H., GOERTZEN, J.O. AND RHOADES, J.D., 1978. Effects of clay type and content, exchangeable sodium percentage and electrolyte concentration on clay dispersion and soil hydraulic conductivity. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 42: 32-39.

FUJIMAKI, H.; INOUE, M. (2003). A Transient Evaporation Method for Determining Soil Hydraulic Properties at Low Pressure. *Vadose Zone Journal - VADOSE ZONE J.* 2.

GABARDO, I. T. Caracterização química e toxicológica da água produzida descartada em plataformas de óleo e gás na costa brasileira e seu comportamento dispersivo no mar / Irene Terezinha Gabardo. – Natal, 2007.

GARDNER, W. R. : Calculation of capillary conductivity from pressure plate outflow data. *Soil Sei. Soc. Am. Proc.* 20 (1956) 317-320

GAWEL, L. J. (2006) *A Guide for Remediation of Salt/Hydrocarbon Impacted Soil: North Dakota Industrial Commission.; Oil and Gas Research Council (N.D.)*

GERSCOVICH D.M.S. 1994 - Fluxo em Meios Porosos Saturados-Não Saturados: Modelagem Numérica com Aplicações ao Estudo da Estabilidade de Encostas na Cidade do Rio de Janeiro - Tese de Doutorado - Depto. Engenharia Civil – PUC-Rio

GERSCOVICH, D.M.S. (2001). Equações para modelagem da curva característica aplicadas a solos brasileiros. In: 4º Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados, NSAT01, Porto Alegre, Anais..., v. 1, p. 76-92.

GERSCOVICH, D. M. S.; GUEDES, M. N.; FONSECA, E. T.. Evaluation of soil-water characteristic curves for problems of unsaturated flow in soils from Brazil. *Solos e Rocha*, v. 27 p. 57-67, 2004.

GRAY, D. H. AND REX, R. W. (1966) Formation damage in sandstones caused by clay dispersion and migration: *Clays and Clay Minerals* 14, 355-566.

GURGEL, C. A. V.; GALVÃO, M. L. DE M.; QUEIROZ G. B. DE, SANTOS E. L. S. C. DOS. Impactos de Extração do Petróleo (Óleo e Gás) no Rio Grande do Norte, na Região do Alto do Rodrigues/RN. *Revista Holos*, Natal, v. 3, p. 130-147, 2013.

GUSTAFSON, J. B. Selection of Representative TPH Fractions Based on Fate and Transport Considerations. [S.l.]: Amherst Scientific Publishers, 1997. 112 p. ISBN1884940129.

HAZEN T, DUBINSKY A, DESANTIS TZ, ANDERSEN GL, PICENO YM, SINGH N,. Deep-sea oil plume enriches indigenous oil-degrading bacteria. *Science*. 2010;330:204–208.

HAKANSSON, I., MEDVEDEV, V.W., 1995. Protection of soils from mechanical overloading by establishing limits for stresses caused by heavy vehicles. *Soil Tillage Res.* 35, 85 – 97.

HEAD, K. H. (1994) “Manual of Soil Laboratory Testing,” Permeability, Shear Strength and Compressibility Tests, Pentech Press, London, 1994, p. 440.

HILLEL, D. *Environmental Soil Physics*. San Diego: Academic Press, 1998.

HOLM, J., 2000. Effects of Biomass Growth on the Hydrodynamic properties of Groundwater Aquifers. Ph.D.-thesis. Series Papers 72. Department of Hydrodynamics and Water Resources, Technical University of Denmark.

HOSSEINI, A., BROWN, J.E., GWYNN, J.P., & DOWDALL, M. (2012). Review of research on impacts to biota of discharges of naturally occurring radionuclides in produced water to the marine environment. *The Science of the total environment*, 438, 325-33.

ICT (2014) MP306 Moisture Probe Operation Manual, Armidale.

IFC, 2007-a. Environmental, health and safety guidelines for offshore oil and gas development. International Finance Corporation – World Bank Group, 25p.

IFC, 2007-b. Environmental, health and safety guidelines for onshore oil and gas development. International Finance Corporation – World Bank Group, 27p.

KOVACS, G. – Seepage Hydraulics. Developments in water science 10. Elsevier Scientific Publishing Company, Budapest, p. 730. 1981.

LaGREGA, M. D.; BUCKINGHAM, P. L. & EVANS, J.C. – Hazardous waste management. Mc Graw – Hill, Inc., Singapore. 1994. p. 1146.

LAMBE, T.W.; WHITMAN, R.V. Soil mechanisms, SI version. New York: J. Wiley & Sons, 1979. 553p. (Series in Soil Engineering).

LAPIDUS, L., AND AMUNDSON, N. R. 1952. Mathematics of adsorption in beds. VI. The effects of longitudinal diffusion in ion exchange and Chromatographic columns. Journal of Physical Chemistry 56:984-988.

LENTZ, R.; SOJKA, R.E.; CARTER, D.L. (1994). Influence of irrigation water quality on sediment loss from furrows.

LEONG, E.C.; RAHARDJO, H. (2002) Soil-water characteristic curves of compacted residual soils. In: 3rd International Conference on Unsaturated Soils, UNSAT 2002, Recife, Proceedings..., v. 1, p. 271-281.

LEONG, E. C.; TRIPATHY, S.; RAHARDJO, H. Total suction measurement of unsaturated soils with device using chilled-mirror dew-point technique. *Géotechnique*, 53 (2), p.173-182, 2003.

LIBARDI, P. L. Potenciais de Água no Solo. Série Didática nº 007, ESALQ/USP, Piracicaba-SP, 1993.

LIMA, Marlon José de. Utilização de geotêxtil não tecido como elemento constituinte de barreiras capilares. 2014. xix, 128 f., il. Tese (Doutorado em Geotecnia)—Universidade de Brasília, Brasília, 2014

LIN, H.S., MCINNES, K.J., WILDING, L.P., HALLMARK, C.T., 1996. Effective porosity and flow rate with infiltration at low tensions in a well-structured subsoil. *Trans. ASAE* 39, 131 – 133.

LIN, H.S., MCINNES, K.J., WILDING, L.P., HALLMARK, C.T., 1999. Effects of soil morphology on hydraulic properties: I. Quantification of soil morphology. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63, 948 – 954.

LIPIEC, J., HATANO, R., SLCOWIN´SKA-JURKIEWICZ, A., 1998. The fractal dimension of pore distribution patterns in variously-compacted soil. *Soil Tillage Res.* 47, 61 – 66.

LIPIEC, J., HATANO, R., 2003. Quantification of compaction effects on soil physical properties and crop. *Geoderma* 116, 107–136.

LIPIEC, J., STEPNIIEWSKI, W., 1995. Effects of soil compaction and tillage systems on uptake and losses of nutrients. *Soil Tillage Res.* 35, 37 – 52.

MACHADO, S. L. Avaliação de Técnicas de Oxidação Química Ativa para Remediação de Aquíferos Contaminados por Compostos Orgânicos através de Ensaio Laboratoriais em Colunas de Solo. Relatório de Projeto de Pesquisa Acadêmica Convênio UFBA/CETRELLUMINA/FAPEX No 08011. 2010.

MARINHO, F.A.M, Medição de sucção em solos. Anais do 3º Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados - Solos não saturados, vol. 2, pp.373 – 397. Rio de Janeiro. 1997.

MARINHO, F.A.M.; STUERMER, M. (2000). The influence of the compaction energy on the SWCC of a residual soil. In: C.D. Shackelford, N.-Y. Chang, & S.L. Houston (eds). *Advances in unsaturated geotechnics*. ASCE Geotechnical Special Publication, n. 99, p.125-141.

MARSHALL, T. J. (1958), A relation between permeability and size distribution of pores, *J. Soil Sci.*, 9, 1–8,

MARTÍNEZ, C. U. (2016). Projeto e Construção de um Permeâmetro de Parede Flexível e Carga Constante. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-271/2016, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 114 p.

MCDOWELL-BOYER L. M.; HUNT J. R.; SITAR N. (1986) Particle transport through porous media. *Water Resour. Res.* 22, 1901-1921.

MCNEAL, B.L.; COLEMAN, N.T. Effect of solution composition on soil hydraulic conductivity. *Soil Science Society of America Proceedings*, Madison, v.30, p.308-312, 1966.

MCNEAL, B.L., NORVELL, W.A. AND COLEMAN, N.T., 1966. Effect of solution composition on the swelling of extracted soil clays. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 30:313-317.

MITCHELL, J.K. AND MADSEN, F.T. (1987), “Chemical Effects on Clay Hydraulic Conductivity,” *Geotechnical Practice for Waste Disposal '87*, Proceedings of Specialty Conference, Ann Arbor, Michigan, June 15-17, Geotechnical Special Publication, no. 13, pp. 87-116

MOGHADASI, J., MULLER-STEINHAGEN, H., JAMIALAHMADI, M., SHARIF, A., 2004. Theoretical and experimental study of particle movement and deposition in porous media during water injection. *Journal of Petroleum Science and Engineering* 43, 163–181

MOHAN, K.K.; REED, M.G., FOGLER, H.S. (1998) Formation damage in smectitic sandstones by high ionic strength brines J. Colloids Surf., 154 (1998), pp. 249-257

MONCADA, M.P.H. (2004). Estudo em Laboratório de Características de Colapso e Transporte de Solutos Associados à Infiltração de Licor Cáustico em um Solo Laterítico. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 219p.

MONCADA, M.P.H., Avaliação de propriedades hidráulicas de solos tropicais não saturados. Tese de doutorado. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 324p, 2008.

MUALEM, Y. Hysteretical models for prediction of the hydraulic conductivity of unsaturated porous media, Water Resources Research, vol.12, no.6, pp.1248-1254. 1976.

NEFF, J., LEE, K., DEBLOIS, M.E., 2011. Produced water: overview of composition, fates, and effects. In: Lee, K., Neff, J. (Eds.), Produced Water, Environmental Risks and Advances in Mitigation Technologies. Springer, New York Dordrecht Heidelberg London, p. 5

NUTTING, P. G., 1930, Physical analysis of oil sands: Am. Assoc. Petroleum Geologists Bull., v. 14, p. 1337-1349.

OGATA, A., AND BANKS, R. B. 1961. A solution of the differential equation of longitudinal dispersion in porous media. U.S. Geological Survey Professional Paper 411-A, A1-A9.

OLIVEIRA, J.C.S. (2001). Contaminação de Sedimentos Argilosos por Combustíveis Automotivos: Problemas de Avaliação da Permeabilidade. 127 p. Tese (Doutorado em Geologia) - Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, Salvador.

OLIVEIRA, R. C. G., OLIVEIRA, M. C. K. Remoção de Contaminantes Tóxicos dos Efluentes Líquidos Oriundos da Produção de Petróleo no Mar. Boletim Técnico: Petrobras, Rio de Janeiro, 2000

OLIVEIRA, O. M.; MARINHO, F. A. M. Aspectos da curva de retenção de água de um solo residual compactado. V. Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados, 2004.

OGP, 2002. The International Association of Oil & Gas producers. Aromatics in produced water: occurrence, fate and effects, and treatment. Report I. 20/324. January 2002, 24 o.

PAGLIAI, M., PELLEGRINI, S., VIGNOZZI, N., ROUSSEVA, S., GRASSELLI, O., 2000. The quantification of the effect of subsoil compaction on soil porosity and related physical properties under conventional to reduced management practices. In: Horn, R., van den Akker, J.J.H., Arvidsson, J. (Eds.), Subsoil Compaction—Distribution, Processes and Consequences. Adv. Geocol., vol. 32. Catena, Reiskirchen, Germany, pp. 305 – 313.

- PARKER, J. C. Multiphase flow and transport in porous media. *Reviews of Geophysics*, v. 27, n. 3, p. 311–328, 1989.
- PETRÓLEO BRASILEIRO S.A. Relatório de Sustentabilidade. Rio de Janeiro (2010)
- PUPISKY, H. AND SHAINBERG, I., 1979. Salt effects on the hydraulic conductivity of a sandy soil. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 43: 429-433.
- REED, M. G. (1972) Stabilization of formation clays with hydroxy-aluminum solutions: *J. Petrol. Techn.* 253, 860-864.
- REICHERT, J. M.; SUZUKI, L. E. A. S. & REINERT, D. J.; HORN, R. & HAAKANSSON, I. Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. *Soil Till. Res.*, 102: 242-254, 2009.
- REICHARDT, K.; TIMM, L. C. Solo, planta e atmosfera: Conceitos, processos e aplicações. 2.ed. Barueri: Manole, 2012.
- REYNOLDS, O., 1883. An experimental investigation of the circumstances which determine whether the motion of water shall be direct or sinuous, and of the law of resistance in parallel channels.
- RICHARDS, L.A. Capillary conduction of liquids through porous media, *Physics*, vol. 1, pp. 318-333. 1931.
- RIDLEY, A.M.; BURLAND, J.B. (1993). A new instrument for the measurement of soil moisture suction. *Géotechnique*, v.43 n.2, p. 321-324.
- RIDLEY, A.M.; WRAY, W.K. (1995). Suction measurement: a review of current theory and practices. In: 1st International Conference on Unsaturated Soils, UNSAT 1995, Paris, *Proceedings...*,v.3, p. 1293-1322.
- ROCHA, M. F.; VARGAS, C. A. L.; GITIRANA, G. F. N.; DIEMER, F. (2014). Estudo Comparativo de Técnicas de Medição de Sucção Total do Solo: Papel Filtro e um Potenciômetro de Ponto de Orvalho. XVII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Goiania, GO.
- ROWE, R.K AND VANGULCK, J.F. (2004) “Filtering and drainage of contaminated water”, Keynote Lecture, 4th International Conference on GeoFilters, Stellenbosch, South Africa, October, University of Witswatersrand, A.Fourie (Ed), pp1-63.
- ROWELL, D.L., PAYNE, D. AND AHMAD, N., 1969. The effect of the concentration and movement of solution on the swelling, dispersion and movement of clay in saline and alkali soils. *J. Soil Sci.*, 20: 176--188.
- SHAINBERG, I. AND LETEY, J. (1984) Response of soil to sodic and saline conditions. *Hilgardia*, 52, 1-57.

SCHRAMM, M.; WARRICK A. W. , FULLER, W. H. (1986) .Hazardous Waste and Hazardous Materials. Jan 1986.21-27

SHACKELFORD, C. D., JEFFERIS, S. A. Geoenvironmental engineering for in situ remediation. In: GEOENG. Anais Eletrônico. Melbourne, Australia, 2000.

SHACKELFORD, C. D. Contaminant Transport. In: DANIEL, D. E. Geotechnical Practice for waste Disposal. London: Chapman & Hall, p. 33-65, 1993.

SHACKELFORD C.D. (1994) Critical concepts for column testing. In: Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, 120 (10):1804-1828.

SILVA, V. P.; PEGADO, É. A. C. Licenciamento ambiental on shore: limite e otimização. Natal: IFRN, 2009.

SOUSA, R. P. Estudo do fluxo de óleo diesel e água em solos não saturados: Desenvolvimento experimental e modelagem matemática. Tese Doutorado UFBA, Salvador-BA, 2012.

SOUZA, V. A. D. DE; CASTRO, M. A. H. DE. Análise de fluxo multifásico em solo não saturado para verificação da vulnerabilidade ambiental de bacias de contenção de tanques de armazenamento de combustível. Eng. Sanit. Ambient. [online]. 2014, vol.19, n.1, pp.11-22.

TAYLOR, S. W. AND P. R. JAFFÉ, 1990a. Biofilm Growth and the Related Changes in the Physical Properties of a Porous Medium. 1. Experimental Investigation. Water Resources Research, Vol. 26, No. 9, p. 2153-2159.

TCHOBANGLIOUS G, BURTON FL, DAVID-STENSEL H. Wastewater Engineering: Treatment and Reuse e in: Metcalf & Eddy. New York McGraw-Hill Companies, 2003.

TEIXEIRA, . M. A.. Montagem e teste laboratorial de coluna para obtenção de parâmetros de transporte e pré-avaliação da técnica de oxidação química em solo contaminado por 1,2-DCB. 173 p. il. 2012. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2012.

TERRA, J.; SANCHES, R. O.; BUENO, M. I. M. S.; MELQUIADES, F. B. Análise Multielementar de solos: uma proposta envolvendo equipamento portátil de fluorescência de raios X. Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas, Londrina, v. 35, n. 2, p. 207-214, jul./dez. 2014.

TIEN C. AND PAYATAKES A. C. (1979) Advances in deep-bed filtration. A.I.Ch.E.JI 25, 737-759.

TINJUM, J; BENSON, C; BLOTZ, L. R.. (1997). Soil-Water Characteristic Curves for Compacted Clays. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering - J GEOTECH GEOENVIRON ENG.

TOBIASON J. E. AND O'MELIA C. R. (1988) Physicochemical aspects of particle removal in depth filtration. *J. A WWA* 80, 54-64.

TRUDEL, K., BELORE, RANDY.C., MULLIN, J.V., GUARINO, A., 2010. Oil Viscosity Limitation on Dispersibility of Crude Oil Under Simulated at-sea Conditions in A Large Wave Tank. *Marine Pollution Bulletin* 60, 1606-1614

USDA - U.S. SALINITY LABORATORY STAFF. 1954. L. A. RICHARDS (ED.) Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. *Agric. Handbook n° 60*, USDA U.S Government Printing Office, Washington, D.C

VANAPALLI, S.K., FREDLUND, D.G; PUFAHL, D.E; CLIFTON, A.W. 1996. Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction. *Can. Geotech. J.* 33:379–392.

VANAPALLI, S.K., D.E. PUFAHL, AND D.G. FREDLUND. 1999A. Interpretation of the shear strength of unsaturated soils in undrained loading conditions. p. 643–650. 52nd Canadian Geotechnical Conference Regina. 25–27 Oct. 1999.

VANAPALLI, S.K., FREDLUND , D.G., AND PUFAHL, D.E. 1999B. The influence of soil structure and stresshistory on the soil water characteristics of a compacted till. *Geotechnique*, 49: 143-159

VANDEVIVERE, P. & BAVEYE, P. 1992C Relationship between transport of bacteria and their clogging efficiency in sand columns. *Applied and Environmental Microbiology* 58, 2523–2530.

VANDEVIVERE, P., P. BAVEYE, D. S. DE LOZADA, AND P. DELEO, 1995. Microbial clogging of saturated soils and aquifer materials: Evaluation of mathematical models. *Water Resources Research*, vol. 31, No. 9, p. 2173-2.

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

VAN GENUCHTEN, M. TH. (1981). Analytical solutions for chemical transport with simultaneous adsorption, zero-order production and first-order decay. *Journal of Hydrology*. 49. 213-233.

VAN GENUCHTEN, M. TH. & SIMUNEK, J.J. (1996). Evaluation of Pollutant Transport in the Unsaturated Zone. 139-172.

VELESCO-MOLINA, H.A., SWOBODA A.R.; GODFREY, C.L. 1971. Dispersion of soils of different mineralogy in relation to sodium adsorption ratio and electric concentration. *Soil Science* 111:2132-287.

YAO K. M., HABIBIAN M. T. AND O'MELIA C. R. (1971) Water and wastewater filtration: concepts and application. *Envir. Sci. Technol.* 5, 1105-1 ! 12.

YAPA, P., WIMALARATNE, M., DISSANAYAKE, A. AND DEGRAFF JR., J., 2012. How Does Oil Behave When Released in Deepwater. *Journal of Hydro-Environment Research* 6, 275–285.

YONG, R.N.; MOHAMED, A.M.O.; WARKENTIM, B.P. (1992) *Principles of Contaminant Transport in Soils*. Amsterdam, Elsevier, 327 p.

YOUSAF, M.; ALI, O.M.; RHOADES, J.D. Clay dispersion and hydraulic conductivity of some salt-affected arid land soils. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v.51, p.905-907, 1987

ZHANG, S., GRIP, H., LOVDAHL, L., 2006. Effect of soil compaction on hydraulic properties of two loess soils in China. *Soil Till. Res.* 90, 117–125

ZHANG, Y.; PERSON, M.; MERINO, E. Hydrologic and geochemical controls on soluble benzene migration in sedimentary basins. *Geofluids*, v. 5, n. 2, p. 83–105, 2005. ISSN 14688115.

ZHAO, Y., PETH, S., HORN, R., KRUMMELBEIN, J., KETZER, B., GAO, Y., DOERNER, J., BERNHOFER, C., PENG, X., 2010. Modeling grazing effects on coupled water and heat fluxes in Inner Mongolia grassland. *Soil Till. Res.* 109, 75–86

ZHONG, Z.; YOU, F. (2011). Oil spill response planning with consideration of physicochemical evolution of the oil slick: A multiobjective optimization approach. *Computers & Chemical Engineering*.

ZORNBERG, J.G.; BOUAZZA, A. & McCARTNEY, J.S. (2009). *Geosynthetic Capillary Barriers: Principles and Applications*. Invited Keynote Lecture, 1st African Conference on Geosynthetics, GeoAfrica 2009, Cape Town, South Africa. pp. 1-39.