



Felipe Alves Rosa

**Um estudo de procedimentos
numéricos e experimentais para uso no
Ensaio de Infiltração Monitorada**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para
obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio.

Orientador: Prof. Eurípedes do Amaral Vargas Jr.

Rio de Janeiro

Abril de 2017



Felipe Alves Rosa

**Um estudo de procedimentos
numéricos e experimentais para uso
no Ensaio de Infiltração**

Monitorada

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Eurípedes do Amaral Vargas Júnior

Orientador

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental– PUC-Rio

Dr. Guilherme José Cunha Gomes

Departamento de Estradas de Rodagem do Estado do Espírito Santo

Prof^a. Raquel Quadros Velloso

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental– PUC-Rio

Prof. Rodrigo Menezes Raposo de Almeida

Universidade Federal Fluminense

Prof. Márcio da Silveira Carvalho

Coordenador Setorial do

Centro Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 07 de abril de 2017.

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, da autora e do orientador.

Felipe Alves Rosa

Graduou-se em Engenharia de Recursos Hídricos e do Meio Ambiente pela Universidade Federal Fluminense em 2012, atuando principalmente nos seguintes temas: geotecnia, modelagem matemática, intrusão salina, aquíferos costeiros, hidroquímica e remediação de áreas contaminadas. É Coordenador de Projetos e Responsável Técnico na empresa 3Geo Consultoria Ltda., realizando projetos de: gerenciamento de áreas contaminadas; dimensionamento de sistemas de remediação in-situ; projetos detalhados de remediação ex-situ; Estudos e modelos matemáticos de disponibilidade hídrica; e modelagem matemática de fluxo subterrâneo.

Ficha catalográfica

Rosa, Felipe Alves

Um estudo de procedimentos numéricos e experimentais para uso no Ensaio de Infiltração Monitorada / Felipe Alves Rosa ; orientador: Eurípedes do Amaral Vargas Jr. – 2017.

131 f. : il. color. ; 30 cm

Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil, 2017.

Inclui bibliografia

1. Engenharia civil – Teses. 2. Ensaio de Infiltração Monitorada. 3. Solos não saturados. 4. Problema inverso. 5. Curva característica. I. Vargas Júnior, Eurípedes do Amaral. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. III. Título.

Agradecimentos

Sou sinceramente agradecido:

À Renata, que desde o início da minha carreira acadêmica esteve presente, dividindo as minhas angústias e felicidades e sempre me apoiando, me fazendo acreditar que estava no caminho certo, sem deixar eu desistir dos meus objetivos, fazendo com que eu conseguisse terminar com êxito este estudo.

Aos meus pais, Elias e Ana, que não mediram esforços para eu alcançar meus objetivos, e fizeram com que eu conquistasse cada etapa da minha jornada com sucesso, dignidade e caráter. Aos meus irmãos, André e Rafael, que sempre me apoiaram e ensinaram a ter maturidade para encarar os problemas e obstáculos da vida. Gostaria de agradecer especialmente ao meu irmão André por ter me auxiliado no desenvolvimento de algumas ferramentas computacionais que utilizei neste estudo.

Ao orientador, Prof. Vargas, pela orientação e paciência durante este trabalho e por ter me fornecido todo suporte, material e equipamentos necessários para a conclusão deste trabalho

A Guilherme Gomes, por ter fornecido todas as ferramentas necessárias para a resolução dos problemas numéricos de otimização, estando sempre disposto a ajudar nesta pesquisa sem medir esforços.

Ao professor Rodrigo Raposo, por apoiar não apenas a realização do Mestrado, mas também a realização desta dissertação, disponibilizando equipamentos e software necessários para a realização deste.

À professora Raquel Velloso, que contribuiu diretamente na elaboração deste trabalho auxiliando na resolução dos problemas numéricos.

A todos os colegas de turma do mestrado na PUC-RJ com os quais tive o prazer de aprender e compartilhar conhecimentos. Aos colegas e bolsistas Álvaro e Ruan que contribuíram muito com o desenvolvimento desta pesquisa e, principalmente nas atividades de campo.

Resumo

Rosa, Felipe Alves; Vargas Junior, Eurípedes do Amaral. **Um estudo de procedimentos numéricos e experimentais para uso no Ensaio de Infiltração Monitorada**. Rio de Janeiro, 2017. 131p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A determinação dos parâmetros hidráulicos não saturados em laboratório nem sempre representa efetivamente as situações observadas em campo, principalmente devido ao erro causado pelo efeito de escala. Nesse sentido, inúmeros ensaios de campo vêm sendo desenvolvidos, fazendo o uso de medidas de carga de pressão no tempo, para a determinação das propriedades hidráulicas não saturadas. No presente estudo, foi utilizado o ensaio de campo proposto por Velloso (2000), denominado Ensaio de Infiltração Monitorada (EIM). Neste ensaio é mantida uma carga constante, utilizando um permeâmetro tipo Gueplh, sendo monitorada, com o auxílio de um tensiômetro, a variação da sucção ocasionada pela frente de infiltração. Quando a variação da sucção no solo torna-se constante e próxima a zero, o ensaio atingiu, portanto, a condição de fluxo permanente, podendo-se assim finalizar o teste. Os parâmetros do solo e os respectivos parâmetros do modelo de Van Genuchten (1980), os quais descrevem a curva de saturação versus o potencial mátrico, são obtidos matematicamente, através da resolução do problema inverso. Nesse sentido, o objetivo principal do presente trabalho é realizar uma avaliação detalhada dos procedimentos numéricos e experimentais para uso no Ensaio de Infiltração Monitorada (EIM), seguindo as diretrizes e recomendações apontadas nos estudos anteriormente realizados. Desta forma, buscou-se um melhor entendimento do EIM, e para isto, foram realizadas: análises comparativas com resultados de ensaio de laboratório do tipo papel filtro; foi adicionado o monitoramento de umidade de solo durante o EIM; e foram utilizados diferentes métodos de estimativa de parâmetros. Os ensaios apresentados no presente estudo foram realizados em cinco áreas do Estado do Rio de Janeiro.

Palavras-chave

Ensaio de Infiltração Monitorada; Solos não saturados; Problema inverso; Curva característica.

Abstract

Rosa, Felipe Alves; Vargas Junior, Eurípedes do Amaral. **A numerical and experimental procedure study for use in the Monitored Infiltration Test**. Rio de Janeiro, 2017. 131p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The determination of unsaturated hydraulic parameters in laboratory tests is not always represents as observed on the field, especially because of the presence of errors caused by the scale factor. So, several field tests have been developed using suction measures with time for a determination of the unsaturated hydraulic properties. This research aims to use the field test proposed by Velloso (2000), called Monitored Infiltration Test (EIM) to determine the Soil Water Characteristic Curve. In this test the constant head is maintained, using a constant head permeameter and, at the same time, monitoring a variation of the suction caused by the infiltration front with a tensiometer. When a variation of the suction in the soil becomes constant and close to zero, then, the test reached a condition of permanent flow, being possible to finalize the procedure. In addition, the soil water characteristic curve (SWCC) and the respective Van Genuchten parameters, that describes a saturation curve versus the matric potential, are obtained mathematically by solving the inverse problem. In this context, the main objective of this research is to develop a detailed evaluation of the numerical and experimental procedures to use it in the Monitored Infiltration Test (EIM), following the guidelines and recommendations pointed out in previous studies in the area. Moreover, was sought a better understanding of EIM, and for this, comparative analyzes were performed with laboratory test results of the filter paper type. In addition, it was added the soil moisture monitoring during the EIM. Finally, was used many optimization methods for parameter estimation. The tests developed and presented in this research, were performed in five areas around the State of Rio de Janeiro.

Keywords

Monitored Infiltration Test; Unsaturated Soil; Inverse problem; Soil Water Characteristic Curve.

Sumário

1	Introdução	18
1.1.	Estrutura da Dissertação	20
1.2.	Objetivos	21
2	Fluxo em solos não saturados	22
2.1.	Propriedade hidráulicas de solos não saturados	22
2.1.1.	Curva característica	22
2.1.2.	Permeabilidade não saturada	26
2.2.	Solução numérica para fluxo não saturado	27
2.3.	Métodos para determinação da curva característica	28
2.3.1.	Ensaio de laboratório	29
2.3.2.	Ensaio de campo	33
3	Ensaio de Infiltração Monitorada	35
3.1.	Estudos Anteriores	35
3.2.	Metodologia do ensaio	50
3.2.1.	Equipamentos utilizados	50
3.2.2.	Procedimentos do ensaio	59
3.3.	Ensaio de campo	64
3.3.1.	Localização e descrição dos EIM realizados em solos residuais	64
3.4.	Ensaio de laboratório	70
4	Estimativa de parâmetros	72
4.1.	Revisão bibliográfica - Otimização dos parâmetros	73
4.1.1.	Levenberg-Marquardt – Hydrus	74
4.1.2.	Inferência Bayesiana - DREAM	75
4.1.3.	Modelo substituto - Regressão Polinomial Evolucionária (EPR)	79
4.2.	Metodologia para estimativa de parâmetros	81

4.2.1. Método inverso através do método de otimização de Levenberg-Marquardt – software Hydrus	82
4.2.2. Utilização de modelo numérico para inferência bayesiana – Dream/Hydrus	83
4.2.3. Utilização de modelo substituto para inferência bayesiana – DREAM/EPR	84
5 Resultados	88
5.1. Ensaio de laboratório - Caracterização física e papel filtro	88
5.2. Resultados dos Ensaios de Infiltração Monitorada	93
5.2.1. BG-01 e BG-02	94
5.2.2. GF-01-J	95
5.2.3. GF-02-J	101
5.2.4. GF-03-M	107
5.2.5. Colúvio	112
5.3. Resultados dos ensaios de permeabilidade saturada	117
5.4. Adição dos resultados de teor de umidade volumétrica no EIM	118
5.4.1. GF-02-J	118
5.4.2. GF-03-M	121
6 Considerações finais	124
7 Referências bibliográficas	126

Lista de figuras

Figura 1 - Representação da curva característica (Fredlund e Rahardjo,1993).	23
Figura 2 –Significado físico dos parâmetros da curva de saturação (Acosta & Promotor, 2016).	24
Figura 3 –Curvas características típicas para solos arenosos, siltosos e argilosos (Gitirana Jr. & Fredlund, 2004 apud Carvalho et. al, 2015).	25
Figura 4 – Ilustração da trajetória de umidecimento e secagem da curva característica (Fredlund & Xing, 1994).	26
Figura 5 – Representação da curva de permeabilidade não saturada (Fredlund e Rahardjo (1993).	27
Figura 6 - Esquema de montagem do equipamento utilizado para o ensaio de placa de sucção (Carvalho et. Al, 2015 cap. 10).	30
Figura 7 - Detalhe da câmara de Richards (Silva, 2005).	31
Figura 8 – Esquema do Cone Penetrometro modificado (Gribb, 1996)	34
Figura 9 - Ensaio proposto por Velloso (2000).	37
Figura 10 – Configuração de arranjos do tensiômetro utilizado por Pinto (2013).	44
Figura 11 – Equipamentos utilizado para a realização dos ensaios	51
Figura 12 – Visão geral do Permeâmetro de carga constante automatizado desenvolvido.	53
Figura 13 – Desenho esquemático da variação da pressão dentro do permeâmetro de carga constante	54
Figura 14 – Determinação da taxa de infiltração através do ajuste linear da curva do ensaio.	55
Figura 15 – Adaptação feita nos sensores de umidade do solo.	57

Figura 16 – Procedimento de calibração dos sensores de umidade.	58
Figura 17 – Exemplo de curva de calibração dos sensores de umidade.	58
Figura 18 – Geometria do ensaio utilizando sensores de umidade na posição (a) diametralmente oposta ao tensiômetro e horizontal e (b) apenas horizontal.	60
Figura 19 – Preparação do terreno e instalação do tensiômetro.	61
Figura 20 – Montagem final do ensaio em terreno plano.	62
Figura 21 – Preparação final do ensaio com execução de berma.	62
Figura 22 – Detalhe do enchimento do furo.	63
Figura 23 – Curvas típicas do Ensaio de Infiltração Monitorada, sendo em vermelho a variação da sucção monitorada pelo tensiômetro e em verde a variação da coluna d'água no permeâmetro.	64
Figura 24 – Recorte do mapa geológico do Estado do Rio de Janeiro em escala 1:500.000. O local do ensaio está destacado pelo círculo vermelho.	66
Figura 25 – Identificação visual do perfil de alteração do solo residual, identificado pela linha tracejada.	67
Figura 26 – Recorte do mapa geológico do Estado do Rio de Janeiro, com a indicação do local ensaio realizados.	68
Figura 27 – Detalhe do solo residual jovem GFJ-01 em São Gonçalo, com presença de minerais pouco intemperizados.	69
Figura 28 - Detalhe do solo residual maduro realizado em Niterói, denominado de GFM-01.	69
Figura 29 – Localização do ensaio realizado em Colúvio em Itaboraí.	70
Figura 30 – Diagrama resumido para determinação de parâmetros em problemas inversos (adaptado de Velloso, 2000).	73

Figura 31 – Fluxograma para resolução de problemas inverso utilizando o software HYDRUS com o algoritmo de otimização de Levenberg-Marquardt (adaptado de Cheng, 2014).	75
Figura 32 - Fluxograma resumido dos procedimentos de otimização com o DREAM. A função <i>Likelihood</i> , é utilizada para estimar a probabilidade conjunta de resíduos do modelo. A decisão da melhor estimativa é baseado no valor da função <i>Likelihood</i> . O Banco de Dados armazena apenas o parâmetro de estado definido em cada iteração. O conjunto de parâmetros candidatos é gerado a partir de evolução diferencial (modificado de Cheng, 2014).	77
Figura 33 Esquema da Distribuição posterior do parâmetro. A suavização de Kernel é usada para reduzir os efeitos dos ruídos na cadeia de Markov (Cheng, 2014).	78
Figura 34 – Fluxograma simplificado de organização dos métodos utilizados	82
Figura 35 – Malha de elementos finitos com 1 cm e condição de contorno impostas no modelo, em vermelho carga hidráulica constante.	83
Figura 36 – Exemplo de distribuição prévia dos parâmetros hidráulicos utilizados.	85
Figura 37 – Ilustração das curvas de infiltração geradas pelo modelo direto e utilizando os 100 (cem) conjuntos de parâmetros hidráulicos de entrada.	86
Figura 38 – Exemplo de calibração do modelo gerado pela EPR	87
Figura 39 – Curva granulométrica – BG-01	90
Figura 40 – Curva granulométrica – GF-J-01	90
Figura 41 – Curva granulométrica – GF-J-02	91
Figura 42 – Curva granulométrica GF-M-03	91
Figura 43 – Curva granulométrica Colúvio	92
Figura 44 – Síntese das curvas características obtidas pelo ensaio de Papel Filtro	93

Figura 45 – Variação da sucção no ensaio BG-01.	95
Figura 46 – Curva de infiltração BG-02.	95
Figura 47 – Variação da sucção e umidade volumétrica e geometria do ensaio – GF-01-J	96
Figura 48 – Distribuição prévia dos parâmetros hidráulicos não saturados – GF-01-J.	97
Figura 49 – Consolidação das curvas características obtidas pelos diferentes métodos de análise, estando representado em laranja a curva obtida pela análise inversa do Hydrus, em azul a curva obtida pelo DREAM conjugado com o Hydrus 2D, em verde a curva obtida pelo DREAM utilizando o modelo substituto (EPR) e a linha tracejada ilustra a curva característica obtida em laboratório pelo método do papel filtro.	98
Figura 50 – Ajuste da curva de infiltração para os diferentes métodos testados - GF-01-J.	100
Figura 51 – Curva de calibração para os diferentes métodos testados – GF-01-J.	100
Figura 52 – Variação da sucção e umidade volumétrica e geometria do ensaio – GF-02-J	102
Figura 53 – Distribuição prévia dos parâmetros hidráulicos não saturados – GF-02-J.	103
Figura 54 - Consolidação das curvas características obtidas pelos diferentes métodos de análise para o ensaio GF-02-J, estando representado em laranja a curva obtida pela análise inversa do Hydrus, em verde a curva obtida pelo DREAM conjugado com o Hydrus 2D, em verde a curva obtida pelo DREAM utilizando o modelo substituto (EPR) e a linha tracejada ilustra a curva característica obtida em laboratório pelo método do papel filtro.	104
Figura 55 – Ajuste da curva de infiltração para os diferentes métodos testados - GF-01-J.	105

Figura 56 – Curva de calibração para os diferentes métodos testados – GF-02-J.	106
Figura 57 – Variação da sucção e umidade volumétrica e geometria do ensaio – GF-03-M	107
Figura 58 – Distribuição prévia dos parâmetros hidráulicos não saturados – GF-03-M.	108
Figura 59 - Consolidação das curvas características obtidas pelos diferentes métodos de análise, estando representado em laranja a curva obtida pela análise inversa do Hydrus, em verde a curva obtida pelo DREAM conjugado com o Hydrus 2D, em verde a curva obtida pelo DREAM utilizando o modelo substituto (EPR) e a linha tracejada ilustra a curva característica obtida em laboratório pelo método do papel filtro.	109
Figura 60 – Ajuste da curva de infiltração para os diferentes métodos testados - GF-03-M.	110
Figura 61 – Curva de calibração para os diferentes métodos testados – GF-03-M.	111
Figura 62 – Variação da sucção e da umidade volumétrica e geometria do ensaio– Colúvio.	112
Figura 63 – Distribuição prévia dos parâmetros hidráulicos não saturados – Colúvio.	112
Figura 64 - Consolidação das curvas características obtidas pelos diferentes métodos de análise, estando representado em laranja a curva obtida pela análise inversa do Hydrus, em verde a curva pelo DREAM utilizando o modelo substituto (EPR) e a linha tracejada ilustra a curva característica obtida em laboratório pelo método do papel filtro.	114
Figura 65 – Ajuste da curva de infiltração para os diferentes métodos testados - GF-01-J.	115
Figura 66 – Curva de calibração para os diferentes métodos testados – GF-01-J.	116

Figura 67 – Ajuste da sucção e umidade volumétrica observada e calculada com o tensiometro e o sensor de umidade na posição H.	119
Figura 68 – Melhor ajuste considerando a umidade volumétrica observada (pontos) e modelada (linha contínua) no sensor H (azul) e no sensor V (preto).	119
Figura 69 – Curvas características considerando os resultados do Hydrus considerando a umidade.	120
Figura 70 - Ajuste da sucção e umidade volumétrica observada e calculada com o tensiometro e o sensor de umidade na posição V.	122
Figura 71 - Curvas características considerando os resultados do Hydrus considerando a umidade – GF-03-M.	122

Lista de tabelas

Tabela 1 – Índices físicos das amostras coletadas em Solo residual.	89
Tabela 2 – Resumo do ensaio de granulometria	89
Tabela 3 – Parâmetro hidráulicos obtidos através do ensaio de papel filtro	93
Tabela 4 – Parâmetro hidráulicos calculados pelos diferentes métodos utilizados - GF-01-J.	99
Tabela 5 – Matriz de correlação entre os parâmetros retroanalizados – GF-01-J.	101
Tabela 6 – Parâmetro hidráulicos calculados pelos diferentes métodos utilizados - GF-02-J.	105
Tabela 7 – Matriz de correlação entre os parâmetros retroanalizados – GF-02-J	106
Tabela 8 – Parâmetro hidráulicos calculados pelos diferentes métodos utilizados - GF-03-M.	110
Tabela 9 – Matriz de correlação entre os parâmetros retroanalizados – GF-03-M	111
Tabela 10 – Parâmetro hidráulicos calculados pelos diferentes métodos utilizados - GF-02-J.	115
Tabela 11 – Matriz de correlação entre os parâmetros retroanalizados – Colúvio.	116
Tabela 12 – Resultados do ensaio de permeabilidade saturada com permeâmetro de carga constante.	117
Tabela 13 – Parâmetro hidráulicos calculados considerando a umidade volumétrica - GF-02-J.	120
Tabela 14 – Matriz de correlação considerando a umidade volumétrica monitorada.	121

Tabela 15 - Parâmetro hidráulicos calculados considerando a umidade volumétrica - GF-03-M.	123
Tabela 16 - Matriz de correlação considerando a umidade volumétrica monitorada.	123

1 Introdução

Em solos residuais, particularmente em regiões tropicais, como é o caso brasileiro, a condição não saturada é bastante significativa, tornando-se primordial um maior conhecimento sobre os conceitos e as teorias da mecânica dos solos não saturada (Carvalho et al, 2015).

O solo não saturado é composto por um sistema de três fases, sendo uma parcela definida pelas partículas do solo e as demais por dois fluidos imiscíveis (água e ar). As propriedades hidráulicas nestas condições podem ser representadas através da curva característica do solo, definida pela relação do teor de umidade volumétrica com a carga de pressão e através da curva de condutividade hidráulica, que por sua vez, representada pela variação da permeabilidade com a carga de pressão do solo (Fredlund & Rahardjo, 1993). Estas propriedades, representam a influência da carga de pressão (h) na retenção e transmissão de água no solo, tendo em vista que, em solos não saturados, o teor de umidade volumétrica (θ) e a condutividade hidráulica (K) variam em função da carga de pressão (h), diferente do que ocorre em solos saturados, onde estes dois parâmetros, podem ser considerados como constantes.

No que se refere a determinação dos parâmetros hidráulicos não saturados, é importante notar que, nem sempre as condições ensaiadas no laboratório conseguem representar efetivamente as situações reais vistas em campo.

O ensaio de laboratório, apresenta a vantagem de ser mais facilmente controlado que os ensaios de campo. Destacam-se ainda, que podem ser determinadas em laboratório, as relações de curva de retenção ($h \times \theta$) e a curva de condutividade hidráulica ($k \times h$), por meio de ensaios de placa de pressão, papel filtro, entre outros. Apesar disso, uma grande desvantagem destes ensaios, é o erro causado pelo efeito escala.

Em contrapartida, inúmeros ensaios de campo vêm sendo desenvolvidos e fazem o uso de medidas de carga de pressão no tempo, para a determinação das propriedades hidráulicas. Tais ensaios possibilitam o conhecimento da variabilidade espacial das características hidráulicas do solo, importante na determinação dos processos de fluxo. Nesse sentido, vem se verificando com o passar do tempo, que a determinação das propriedades *in-situ*, apesar de em

alguns casos serem consideradas longas e custosas, possam ser mais relevantes e significativas que àquelas obtidas em laboratório (Kool et. al.,1985).

A otimização de parâmetros é uma abordagem indireta para a estimativa dos parâmetros hidráulicos de solos não saturados. Em trabalhos desenvolvidos anteriormente, os pesquisadores Velloso (2000), Morales (2008) e Pinto, (2013) tiveram como foco o Ensaio de Infiltração Monitorada (EIM) e utilizaram, em sua totalidade, o método de otimização de Levenberg-Marquardt. Neste trabalho, por outro lado, objetivou-se a utilização de outros métodos estocásticos de otimização, que, principalmente sejam capazes de fornecer os valores ótimos parâmetros analisados, a distribuição estatística e a incertezas dos parâmetros obtidos.

Para isso, foi utilizado o algoritmo de otimização Differential Evolution Adaptive Metropolis - (DREAM), implementado por Vrugt (2016) no software MatLab. O DREAM, por sua vez, foi aqui utilizado de duas formas, sendo a primeira juntamente com o software HYDRUS 2.05, e a segunda através da otimização de um modelo substituto obtido através do método de Regressão Polinomial Evolucionária – EPR.

Além das diversas abordagens supracitadas, o presente trabalho apresenta ainda, a campanha de ensaios de campo realizados durante a pesquisa e com objetivos da busca de um melhor entendimento do EIM e análise comparativa dos resultados obtidos pelo EIM com o método consagrado do papel filtro.

Os ensaios foram realizados em solos residuais e tiveram como objetivo principal a análise comparativa com resultados de ensaio de papel filtro, no entanto, foram utilizados sensores de umidade do tipo FRD, além da utilização dos métodos de otimização supracitados.

Para a realização dos ensaios em solo residual, buscou-se locais onde houve corte de taludes e, desta forma, expondo o solo residual a ser estudado. Foram realizados um total de 5 (cinco) ensaios em solo residual, sendo três destes realizados em solo residual correspondente à um Gnaisse facoidal nos municípios de Niterói e São Gonçalo, outro em Hornblenda Biotita Ganaisse em Rio das Ostras e, por último, um colúvio em Itaboraí.

Como parte integrante deste trabalho e de forma complementar aos dados obtidos nos ensaios de campo, foram realizados também, ensaio de laboratório de caracterização física do solo e ensaios de papel filtro.

1.1. Estrutura da Dissertação

O presente trabalho está estruturado em seis capítulos distribuídos previamente pelo autor, com o objetivo didático de facilitar a leitura das análises aqui presentes. E ao final, são explicitadas as referências bibliográficas que pautaram as análises do autor.

Nesse sentido, no capítulo 2, aqui tratado como “*Fluxo em solos não saturados*”, são introduzidas algumas questões iniciais, que permitam entender o estudo aqui proposto. Entre as questões apresentadas, ressalta-se a importância dos estudos de solos não saturados no contexto geotécnico, as diferenças de determinação de parâmetros em campo e em laboratório e a busca por métodos de otimização mais robustos. Entre os temas apresentados nesta seção, destacam-se, as propriedades hidráulicas de solos não saturados, solução numérica para fluxo não saturado, métodos para a determinação de uma curva característica e ferramentas para a estimativa de parâmetros em problemas inversos.

No capítulo 3, nomeado “Ensaio de Infiltração Monitorada” são apresentados os principais resultados obtidos pelos estudos anteriormente realizados na área, destacando as suas principais recomendações, as quais foram usadas como base para o desenvolvimento das questões aqui presentes. Entre os principais assuntos tratados, denotam-se questões como a metodologia de ensaio, equipamentos utilizados e procedimentos para a realização dos mesmos. Bem como, apresenta detalhes mais específicos da forma como foram feitos os seus ensaios de campo em solos residuais, descrevendo de forma minuciosa sua localização e características físicas. Ademais, explicita ainda, detalhes dos ensaios de laboratório.

No capítulo 4 nomeado “*Metodologia para estimativa de parâmetros*”, é apresentada a metodologia de cálculo de problemas inversos através dos métodos utilizados, sendo eles: o método de otimização de Levenberg-Marquardt através do uso direto do software Hydrus; e através da inferência bayesiana utilizando o *Differential Evolution Adaptive Metropolis* (DREAM). O DREAM, por sua vez foi utilizado de duas formas, sendo a primeira buscando os resultados do modelo numérico do HYDRUS e a segunda, através de um modelo substituto desenvolvido através da Regressão Polinomial Evolucionária - EPR.

São demonstrados os resultados obtidos em ensaios de campo e de laboratório no Capítulo 5.

Finalmente, no capítulo 6, apresentam-se as considerações finais e recomendações futuras para o desenvolvimento de trabalhos posteriores na área, que possuam temas correlatos aos aqui analisados.

1.2.Objetivos

O objetivo principal do presente trabalho é dar continuidade aos estudos anteriormente realizados na área, por Velloso (2000), Morales (2008) e Pinto (2013), seguindo então aqui, as diretrizes e recomendações apontadas nos referidos estudos, sendo:

- Realização de análise comparativa do Ensaio de Infiltração Monitorada (EIM) com o método consagrado de Papel Filtro.
- Utilização de um modelo em que todos os parâmetros possam ser retroanalisados com somente um ensaio, conforme sugerido por Velloso (2000);
- Comparação e busca de algoritmos de otimização mais eficientes, conforme sugerido por Velloso (2000) e Pinto (2013).
- Monitoramento da umidade volumétrica durante o ensaio de infiltração monitorada, com o propósito de realizar retroanálises para mais de um parâmetro, conforme sugerido por Morales (2008, p 94)
- Desenvolvimento de um permeâmetro mais adequado para o EIM (Pinto, 2013);
- Levantamento das propriedades hidráulicas não saturadas em solos residuais do Estado do Rio de Janeiro, conforme recomendado por Pinto (2013).

2 Fluxo em solos não saturados

2.1. Propriedade hidráulicas de solos não saturados

O solo não saturado é composto por um sistema de três fases, conforme Bear (1972) e Fredlund & Rahardjo (1993), sendo uma parcela definida pelas partículas do solo e as demais por dois fluidos imiscíveis (água e ar) de acordo com o autor.

Segundo Bear (1972), existe uma tensão superficial entre os dois fluidos e uma interface fluido-fluido separando os fluidos nos interstícios do solo. Nesta interface, existe uma diferença de pressão, denominada de pressão capilar, que por sua vez, tem efeitos de sucção no solo, como evidenciado por Fredlund & Rahardjo (1993).

As propriedades hidráulicas de solos não saturados, podem ser representadas através da curva característica do solo, que é definida pela relação do teor de umidade volumétrica com a carga de pressão e através da curva de condutividade hidráulica, e por sua vez, representada pela variação da permeabilidade com a carga de pressão do solo. Estas propriedades, representam a influência da carga de pressão (h) na retenção e transmissão de água no solo, tendo em vista que, em solos não saturados, o teor de umidade volumétrica (θ) e a condutividade hidráulica (K) variam em função da carga de pressão (h), diferente do que ocorre em solos saturados, onde estes dois parâmetros, podem ser considerados como constantes.

2.1.1. Curva característica

Segundo Carvalho et. al (2015, cap. 9), a curva característica é umas das propriedades mais fundamentais e, ao mesmo tempo, mais complexas em se tratando de solos não saturados, tendo em vista que, conforme Fredlund e Rahardjo (1993), é a representação gráfica da relação do teor de umidade volumétrica (θ) com a carga de pressão (h), conforme apresentado na Figura 1.

A curva característica também pode ser representada por outras formas, como por exemplo o grau de saturação com a carga de pressão (h), sendo

resultado de diferentes maneiras de apresentar a quantidade de água armazenada no solo e de representar a sucção, segundo estudos de Carvalho et. al (2015, cap. 9).

A Figura 1 apresenta a curva em termos de teor de umidade volumétrica, sendo importante destacar ainda, que o máximo valor de teor de umidade, denominado de teor de umidade saturado (θ_{sat}), em geral, corresponde à porosidade do solo (Carvalho et. al, 2005).

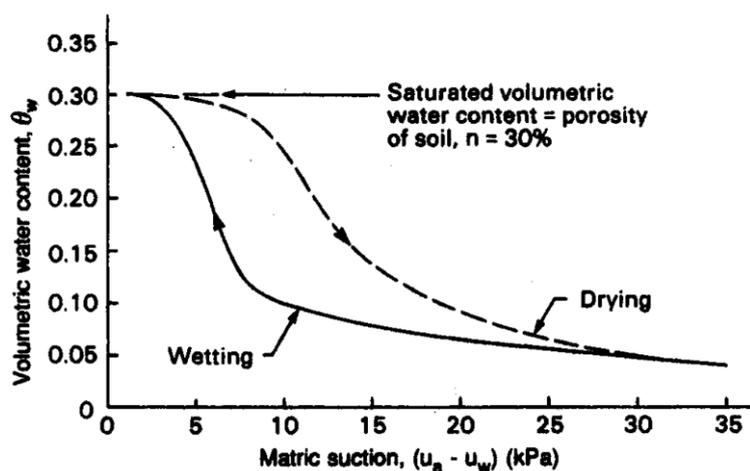


Figura 1 - Representação da curva característica (Fredlund e Rahardjo, 1993).

De forma geral, as curvas de retenção apresentam formatos definidos por parâmetros com significados físicos relativamente bem definidos, conforme apresentado na Figura 2, que ilustra a divisão da curva característica em três trechos, definidos por três parâmetros. O valor de entrada de ar, é representado pela inflexão da curva característica entre a zona saturada e a zona de desaturação, conforme Carvalho et.al. (2015, cap. 9). O significado físico do valor de entrada de ar é atribuído à máxima sucção que os maiores poros do material são capazes de suportar sem serem drenados. Essa relação faz referência à relação do tamanho de poro e raio de menisco com a sucção matricial. A sucção residual, corresponde ao intervalo de sucção para o qual o solo sofre drenagem sob o efeito de aumento da sucção, sendo tal drenagem possível em termos de fluxo de água líquida, ou seja, a água a ser drenada está em uma condição relativamente livre nos poros do solo. Para sucções superiores à sucção residual, a remoção de água exige sucções expressivas e se dá predominantemente, por processos de transferência de vapor.

Segundo Carvalho et. al (2015, cap. 09), o grau de saturação residual corresponde a quantidade de água armazenada nos poros do material em condição relativamente menos livre do que a água drenada na forma de fluxo líquido.

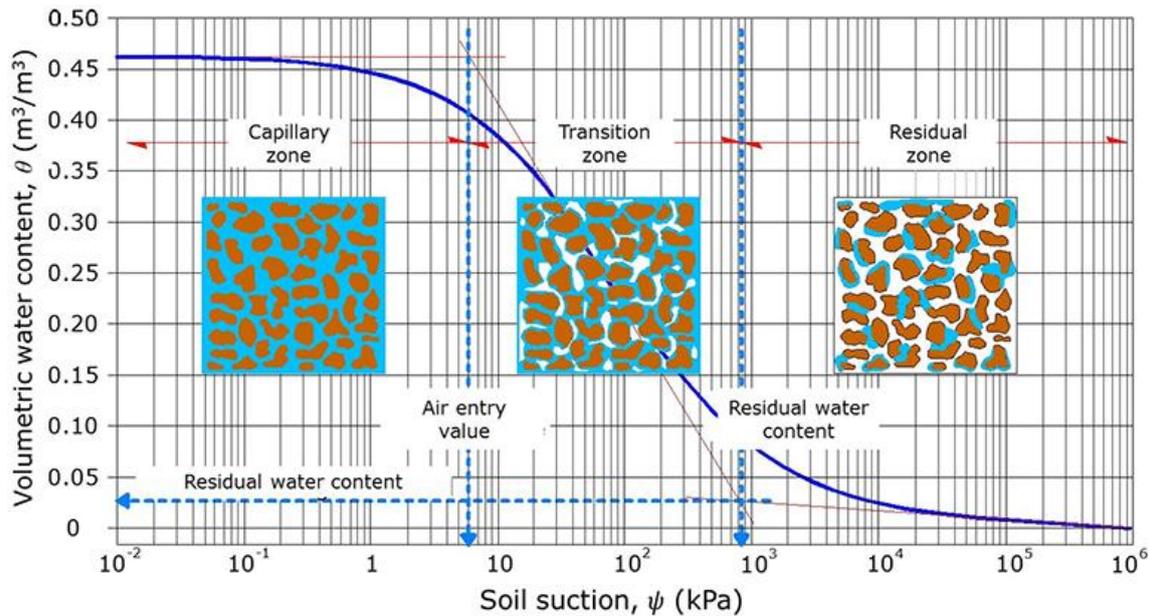


Figura 2 –Significado físico dos parâmetros da curva de saturação (Acosta & Promotor, 2016).

A dimensão dos grãos do solo é um dos fatores que definem a forma e os parâmetros da curva característica, conforme apresentado na Figura 3, que ilustra as diversas formas para curvas características típicas para solos arenosos, siltosos e argilosos. Observa-se ainda, que em geral, solos argilosos apresentam maior valor de entrada de ar e por sua vez, inclinação mais suave, quando comparados com solos arenosos. Já os solos arenosos, possuem poros de maiores dimensões e necessitam de pequenos valores de sucção para reduzir a umidade, ocasionando curvas mais acentuadas.

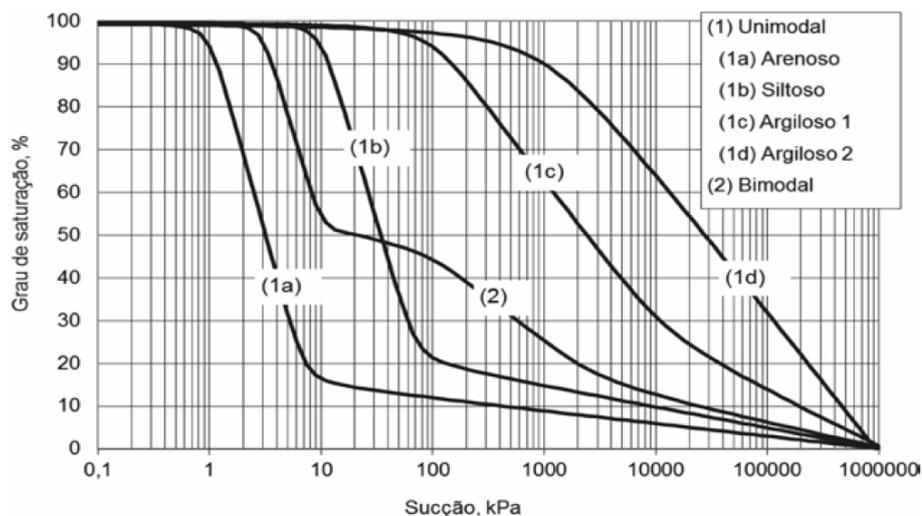


Figura 3 –Curvas características típicas para solos arenosos, siltosos e argilosos (Gitirana Jr. & Fredlund, 2004 apud Carvalho et. al, 2015).

Outro fator importante, e que está ilustrado na Figura 4, é a histerese, ou seja, o histórico de umedecimento e secagem do solo que ocasiona valores diferentes de sucção para a mesma umidade. Desta forma, o mesmo solo pode possuir curvas características distintas para o umedecimento e secagem. Conforme apresentado na Figura 4, é importante destacar que a trajetória de umedecimento não atinge a saturação completa, tendo em vista que, conforme Fredlund & Xing, (1994), ainda é mantido um volume residual de ar.

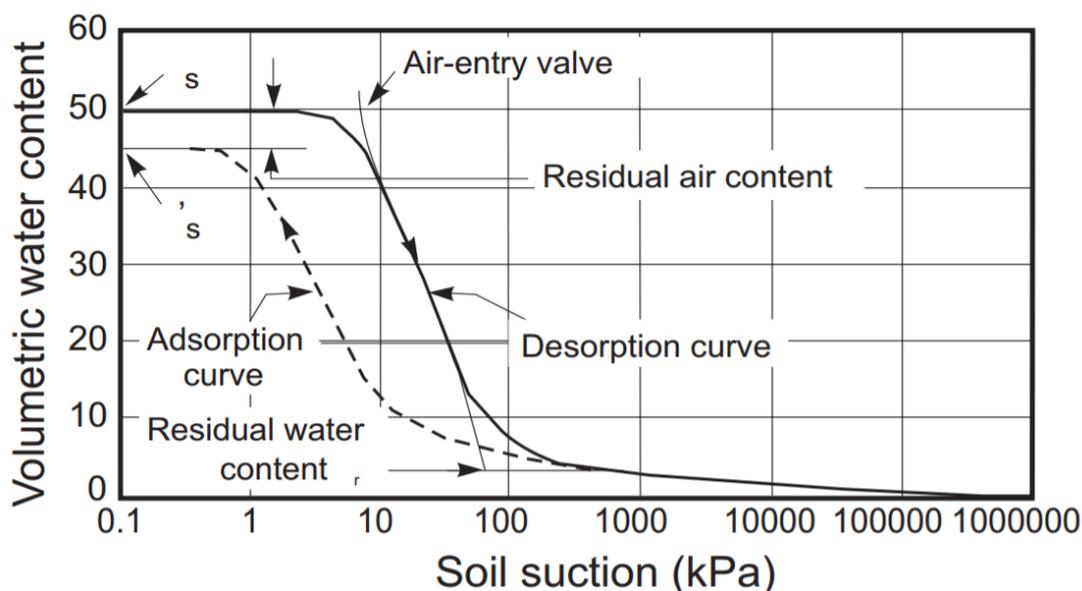


Figura 4 – Ilustração da trajetória de umidecimento e secagem da curva característica (Fredlund & Xing, 1994).

A representação da curva de retenção, é feita através de uma função contínua, que faz-se necessária para análises numéricas envolvendo o fluxo de água e a previsão de diversas propriedades de solos não saturados.

Existem diversos modelos de ajuste da curva característica, como os estudos desenvolvidos por Gardner (1956), Brooks & Corey (1964), Brutsaert (1966), van Genuchten (1980), McKee & Bumb (1984), Fredlund & Xing (1994) e Gitirana Jr. & Fredlund (2004), porém dentre os mais utilizados, pode-se destacar o ajuste realizado por van Genuchten (1980) e que será adotado ao longo deste trabalho.

Segundo o modelo de Van Genuchten (1980), a umidade volumétrica é definida em função da carga de pressão, como:

$$\theta = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{[1 + (\alpha h)^n]^m} \quad (2.1)$$

Onde,

θ é a umidade volumétrica (cm³/cm³)

θ_R é a umidade volumétrica residual (cm³/cm³)

θ_S é a umidade volumétrica saturada (cm³/cm³)

α , n e m são parâmetros de ajuste, (1/cm)

n e m são parâmetros de ajuste adimensionais

h é o potencial matricial (cm)

2.1.2. Permeabilidade não saturada

A função de condutividade hidráulica representa a relação entre a condutividade hidráulica e a sucção do solo, e pode ser expressa em função do grau de saturação ou do teor volumétrico de água do solo.

Em solos saturados, a permeabilidade é máxima e constante, uma vez que todos os seus poros estão totalmente preenchidos por água e, por isso, o teor de umidade volumétrica é igual à porosidade do solo, apresentando, portanto, um grau de saturação de 100%. Por outro lado, em solos não saturados, porções dos poros do solo são preenchidos por ar e

a área útil de condução do fluxo é reduzida e, conseqüentemente, a permeabilidade também.

Assim, considerando solos não saturados, a condutividade hidráulica varia proporcionalmente com o teor de umidade volumétrica e quanto maior este teor, maior por sua vez, é a facilidade da água se movimentar ao longo dos poros do solo e, portanto, maior é a condutividade hidráulica.

A representação gráfica da relação existente entre a condutividade hidráulica (K) e a sucção (h) é dada pela curva de condutividade hidráulica do solo e é apresentada com mais detalhes, na Figura 5.

Segundo Acosta & Promotor (2016), existem diversos métodos para estimativa da curva de permeabilidade não saturada, sendo estes baseados na curva característica e na condutividade hidráulica saturada. Estas técnicas, em geral, são empíricas, estatísticas ou baseadas no modelo de Van Genuchten.

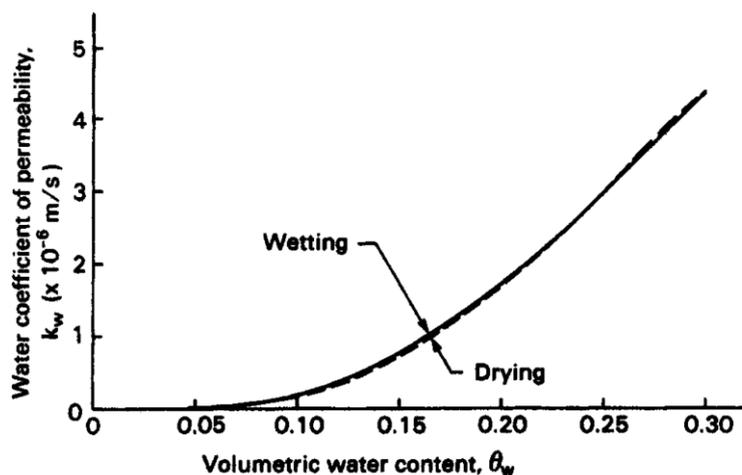


Figura 5 – Representação da curva de permeabilidade não saturada (Fredlund e Rahardjo (1993)).

2.2. Solução numérica para fluxo não saturado

A equação diferencial geral, que descreve o fluxo de água líquida em solos não saturados, foi chamada de Equação de Richards, tal equação, promoveu a combinação entre as Equações de Darcy e Buckingham, conforme explicitada por Carvalho et al (2015, p 312-313), e apresentada da seguinte forma:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[k_x \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[k_y \frac{\partial h}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[k_z \frac{\partial h}{\partial z} \right] = \frac{\partial (\theta)}{\partial t} \quad (2.2)$$

A referida equação pode ser escrita em termos da carga h , da umidade volumétrica (θ) ou em uma forma mista, utilizando as duas grandezas. Tendo em vista que em meios não saturados, a umidade volumétrica (θ) e a carga decorrente da sucção matricial (h_m), estão intimamente relacionadas entre si, logo:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial \theta}{\partial h_m} \frac{\partial h_m}{\partial t} = C(h_m) \frac{\partial h}{\partial t} \quad (2.3)$$

Onde $C(h_m)[L - 1]^m$ é a capacidade de retenção específica, que representa a variação da umidade volumétrica em volume unitário de solo, para uma variação unitária na carga hidráulica. Tal parâmetro, corresponde a derivada da curva característica ou de retenção do solo.

Dessa forma escrevendo a equação 1 em função da carga hidráulica, obtém-se:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left[k_{ij}(h_m) \frac{\partial h_m}{\partial x_j} + k_{i3} \right] = C(h) \frac{\partial h_m}{\partial t} \quad (2.4)$$

Nesta, a carga total é substituída por carga de pressão (h) e carga de elevação (z). Nesse sentido, tendo em vista que o gradiente gravitacional é unitário, o subscrito 3 na parcela k_{i3} corresponde então, ao eixo vertical. Nas equações supracitadas, foi admitido que o fluxo ocorre a volume constante, ou seja, a porosidade foi considerada constante.

A Equação de Richards (1931) é altamente não linear, tendo em vista, que a condutividade hidráulica não saturada e a carga de sucção mátrica dependem do teor de umidade do solo. Assim, conclui-se que soluções analíticas exatas, são somente possíveis para casos de fluxo simples, sob várias hipóteses restritivas. Em casos mais gerais, a solução da equação é possível através de ferramentas numéricas (Neuman, 1973, Gerscovich, 1994; Micheletto, 2007).

2.3. Métodos para determinação da curva característica

Neste item estão apresentados os métodos de laboratório e de campo para a determinação da curva característica. Os métodos apresentados de laboratório são: placa de sucção, a placa de pressão, o método do papel filtro e o método do equilíbrio de vapor. Os métodos de campo apresentados são: Ensaio de Infiltração Monitorada e Ensaio de Cone.

Os métodos de laboratório apresentados, foram escolhidos por serem amplamente utilizados na literatura sobre o assunto (Carvalho et al., 2015 cap. 10,

Klute & Dirksen, 1986 e Bittelli & Flury 2009), no entanto, destaca-se que, em geral, os métodos de campo podem ser mais representativos (Velloso, 2000).

Nos presente estudo foi utilizado o ensaio de campo proposto por Velloso (2000), denominado de Ensaio de Infiltração Monitorada (EIM), além disso, o resultado dos ensaios foram comparados com o ensaio de papel filtro.

2.3.1. Ensaio de laboratório

- *Placa de sucção*

A determinação da curva característica da amostra a partir do ensaio de placa de sucção consiste, basicamente, em obter para diferentes sucções a umidade gravimétrica (w) e volumétrica (θ) da amostra, a partir de um equipamento denominado placa de sucção.

Este equipamento, ilustrado na Figura 6, é composto por uma placa porosa saturada, duas bases com altura regulável, tubo flexível preenchido com água deairada e uma câmara de proteção. A placa porosa, também denominada de placa de sucção, deve ter valor de entrada de ar adequada para a sucção imposta no ensaio, sendo aconselhável ainda, por Carvalho et al. (2015, cap. 10), que este valor seja superior a 20 kPa. Segundo Carvalho et al. (2015), placas porosas com valores de entrada de ar muito elevados (superiores a 70 kPa) podem ocasionar ensaios muito demorados devido à baixa permeabilidade do material poroso.

O ensaio é iniciado então, com o corpo de prova saturado ($w = 100\%$) e a medida que o ensaio é executado, a umidade (w) do corpo de prova é reduzida, devido ao aumento da sucção imposta. A sucção dos diferentes estágios do ensaio, é por sua vez, regulada através a altura do sistema extravasor de água (Figura 6).

No momento em que aumenta-se a sucção imposta, a água da amostra flui pelo sistema extravassor, até atingir o equilíbrio da carga hidráulica do sistema (i.e. quando não for observado gotejamento de água no sistema extravasor). Feito isso, é obtida a massa do corpo de prova e inicia-se outro estágio do ensaio, sendo aumentada a sucção imposta. A sucção de cada estágio, é calculada a partir da diferença de altura entre o corpo de prova e sistema extravasor.

No final do ensaio, é obtida a massa de solo seco após a secagem da amostra em estufa para o cálculo da umidade de cada estágio.

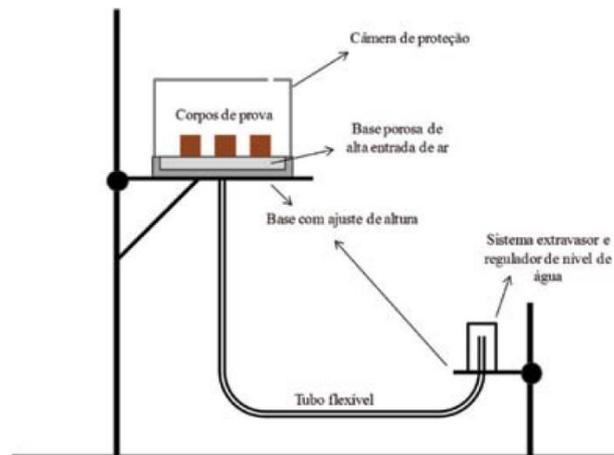


Figura 6 - Esquema de montagem do equipamento utilizado para o ensaio de placa de sucção (Carvalho et. Al, 2015 cap. 10).

Dentre as vantagens deste método, destacam-se:

- Precisão de aproximadamente 0,01 kPa (Carvalho et al., 2015), caso o desnível for medido com precisão de 1 mm;
- Define, com a precisão supracitada, o trecho inicial da curva de retenção;
- Pode ser realizado com múltiplos corpos de prova do mesmo ou de diferentes materiais.

Por outro lado, as desvantagens consideradas são:

- É necessário conhecer o tipo de material e a sua estrutura, para então, estipular os valores de sucção de cada estágio;
- A sucção máxima imposta está limitada por condições práticas de laboratório, tendo em vista que uma sucção de 50 kPa exige um desnível de 5 m. Segundo Carvalho et al. (2015), as sucções normalmente impostas, raramente ultrapassam 20 kPa, i.e. 2 m de desnível, aproximadamente;
- É obtida apenas a curva de secagem;
- Possibilidade de perda de solo durante a manipulação dos corpos de prova em cada estágio.

- *Placa de pressão*

Segundo Carvalho et al (2015), o método da placa de pressão, ou câmara de Richards, consiste em realizar uma mudança do referencial de pressão de ar,

de modo a levar a pressão de água a valores acima do zero absoluto e, deste modo, contornar as dificuldades relacionadas a medir pressões negativas, devido ao fenômeno de cavitação.

Para isto, conforme Carvalho et al. (2015) é importante destacar que iguais valores de sucção matricial causados por diferentes combinações de valores de pressão do ar (u_a) e pressão da água (u_w), possuem o mesmo efeito no solo, resultando no mesmo teor de umidade. Sendo assim, a variação da umidade do solo, não é governada apenas pelo aumento da pressão da água, mas também, pelo aumento da pressão de ar.

Portanto, neste ensaio, para realizar a variação de umidade é necessário ir aumentado artificialmente a pressão de ar existente nos poros, produzindo um acréscimo na pressão da água de magnitude equivalente.

O equipamento utilizado para isto, é denominado de câmara de pressão, ou câmara de Richards, que consiste em uma câmara hermeticamente fechada composta por uma placa porosa de elevada pressão de entrada de ar (100 kPa até 1500 kPa), um duto para aplicação de pressão, um manômetro para medição da pressão de ar (u_a) e uma bureta conectada à placa porosa para medição da pressão da água (u_w), conforme ilustrado na Figura 7. Deste modo, a sucção é calculada através da diferença entre u_a e u_w .

Assim como no ensaio de câmara de sucção, o ensaio da câmara de pressão é iniciado com o corpo de prova saturado e a cada estágio é aumentada a pressão do ar, para reduzir a umidade do corpo de prova e, deste modo, obter a curva de retenção para a secagem.

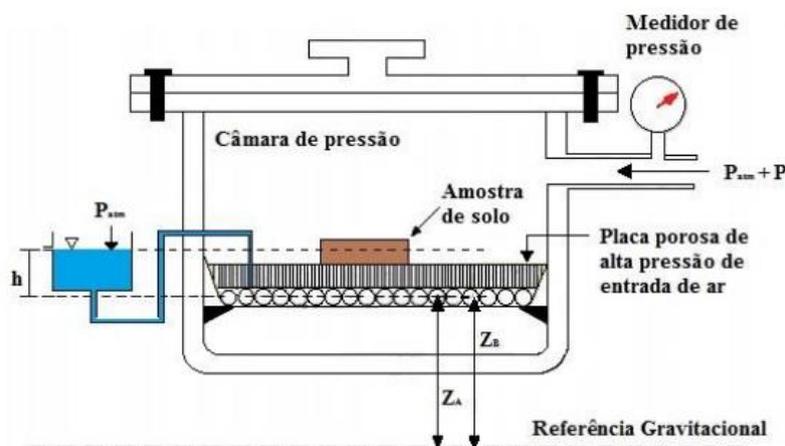


Figura 7 - Detalhe da câmara de Richards (Silva, 2005).

Destaca-se que as vantagens deste ensaio são:

- Poder ser realizado com múltiplos corpos de prova do mesmo ou de diferentes materiais;
- Ser possível medir a pressão positiva e não pressões negativas como na maioria dos ensaios, excluindo-se problemas relacionados ao fenômeno de cavitação.

Pode-se citar as seguintes desvantagens:

- Dependem de um complexo sistema pneumático;
- Possui um lento equilíbrio do potencial da água na amostra;
- Possui dificuldade no controle do ponto de equilíbrio entre a pressão aplicada e a água retida no solo.

- *Método do papel filtro*

O método do papel filtro consiste na quantificação indireta da sucção matricial ou total do solo, através de papéis filtro. Para isto, o solo é colocado em contato com o papel filtro que, por sua vez, absorve água do solo até atingir o equilíbrio. Quando o solo é colocado em contato direto com papel filtro, o fluxo de água ocorre por capilaridade, sendo esta a chamada sucção matricial. Segundo Shen et al. (2013), também é possível obter a sucção total (soma da sucção osmótica e matricial), não colocando o papel filtro em contato direto com o solo, mas sim, fazendo com que o fluxo ocorra através de vapor, vencendo as forças osmóticas e capilares.

Após o equilíbrio é obtida finalmente, a umidade do solo e a do papel filtro. A sucção é obtida através da curva de calibração do papel filtro, através de sua umidade.

- *Método do equilíbrio de vapor*

O método do equilíbrio de vapor é baseado em uma forma de sucção total, sendo possível a aplicação de valores de sucção relativamente elevados. O mesmo, consiste em determinar a sucção total por meio da umidade relativa do ar (UR), esta última, medida pela relação entre a pressão parcial de vapor do ar (p_v) e a pressão parcial de saturação de vapor de ar (p_{v0}). A pressão parcial de saturação corresponde à máxima pressão parcial possível, de forma que ofertas adicionais de umidade ao ar não se transformariam em vapor, havendo condensação (CARVALHO et al., 2015. p 285-287).

Os ensaios exigem os seguintes materiais:

Dessecador ou outro recipiente hermético, de material resistente à corrosão e não higroscópicos.

Solução salina saturada, preparadas previamente, a partir de reagentes e água pura decorrente de destilação (osmose reversa ou similar).

Balança com resolução de 0,001g para pesagem das amostras de solo ou preparação de soluções com ácido sulfúrico.

Estufa com termostato regulador, que permite manter a temperatura entre 105°C e 110°C.

Essa técnica, além de ser utilizada como medida padrão de referência e como calibração de outros equipamentos, pode ser empregada também na determinação de pontos da curva de retenção de água no solo, tendo a vantagem de impor sucção sob condições naturais, não sendo aplicada pressão nenhuma na fase gasosa, como no ensaio de placa de pressão.

No entanto, devido à transferência de umidade ser pela fase gasosa, é necessário maior tempo para estabelecer o equilíbrio termodinâmico, sendo cada vez maior quando a umidade relativa a ser imposta dentro do dessecador, se aproxima a 100%. Os mesmos tempos de equilíbrio sugeridos para o papel filtro, podem ser utilizados na referida técnica.

2.3.2. Ensaio de campo

- Ensaio de Infiltração Monitorada (EIM)

Neste ensaio, proposto inicialmente por Velloso (2000), o coeficiente de permeabilidade da zona não saturada do solo, é determinado a partir de um ensaio de infiltração com carga constante, utilizando um permeâmetro tipo Gueph, automatizado. No início do ensaio, a condição de fluxo é transiente e a taxa de infiltração não é constante ao longo do tempo. No momento que a taxa de infiltração torna-se constante, a condição de infiltração é de fluxo permanente e o ensaio de permeabilidade pode ser finalizado. Durante o ensaio, monitora-se a variação do nível d'água no tubo transparente, através de um transdutor de pressão de vácuo. Quando a variação da pressão de vácuo, torna-se constante no tempo, o ensaio atingiu portanto, a condição de fluxo permanente, podendo-se finalizar o teste.

A curva de saturação do solo e os respectivos parâmetros de Van Genuchten são obtidos matematicamente através da resolução do problema inverso, i.e. o ajuste dos parâmetros que permitem reproduzir a curva de variação da sucção medida no campo, no tensiômetro instalado logo abaixo da zona de

saturação durante o ensaio de infiltração. Deste modo, em um mesmo ensaio de infiltração no campo, com medição da variação da sucção no tempo, é possível determinar o coeficiente de permeabilidade da zona não saturada e os parâmetros de Van Genuchten que descrevem a curva de saturação da zona não saturada.

- Cone Penetrometro

De acordo Simunek et al (1998, p 6-7), o método do Cone Penetrometro, utilizado para estimar as propriedades hidráulicas do solo através da inversão numérica da Equação de Richards, vem sendo um mecanismo cada vez mais utilizado, com o objetivo de satisfazer a necessidade de estudar superfícies mais profundas do solo (Gribb, 1996; Gribb et al.; 1998, Kodesová et al., 1998).

Dessa forma, um cone penetrometro modificado foi desenvolvido e usado com um filtro poroso fechado na ponta do penetrometro e dois anéis de tensiômetro de 5 cm e 9 cm em cima do filtro. O aparelho é então, colocado no solo na profundidade desejada e é aplicada uma carga constante no filtro de 5cm. O volume de água embebido no solo, é então monitorado, enquanto o anel de tensiômetro lê e registra os avanços da frente de molhamento em um pequeno espaço de tempo (300s – 500s), conforme ilustrado na Figura 8.

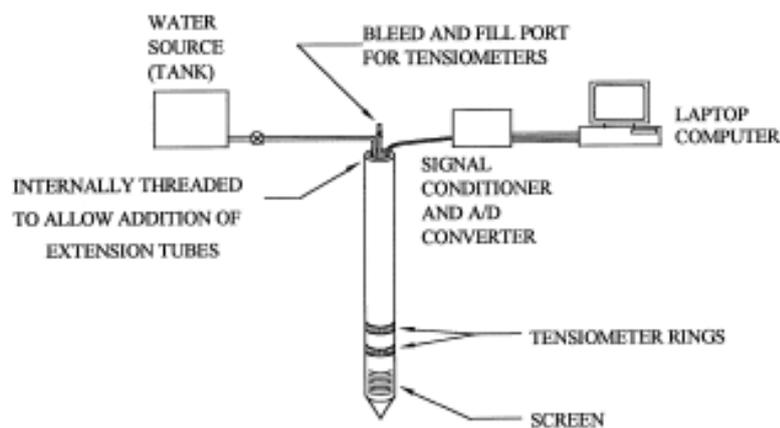


Figura 8 – Esquema do Cone Penetrometro modificado (Gribb, 1996)

3 Ensaio de Infiltração Monitorada

3.1. Estudos Anteriores

Neste item será apresentada uma revisão bibliográfica dos estudos anteriormente realizados sobre o assunto aqui tratado, por Velloso (2000), Morales (2008) e Pinto (2013) que, por sua vez, utilizaram o EIM como tema principal de pesquisa. Estão destacados nesta seção, os objetivos iniciais de cada autor, assim como um resumo de seus principais resultados e recomendações para trabalhos futuros.

- **Velloso (2000)**

Inicialmente, Velloso (2000) em seu trabalho, teve como foco a implementação numérica de um programa, baseado num código de elementos finitos, para a realização da retroanálise de parâmetros de fluxo em solos parcialmente saturados. O trabalho foi realizado, a partir de ensaios de campo, com o objetivo de através deles, obter informações sobre a qualidade da estimativa obtida. O método de retroanálise, usado pela autora, permite a determinação simultânea da curva característica e da curva de permeabilidade, a partir de dados de fluxo transiente.

O programa desenvolvido, foi base para a determinação dos parâmetros de fluxo de um ensaio realizado dentro da PUC – Rio e com base nos resultados obtidos no mesmo e na análise da sensibilidade, foi proposto então, um ensaio de configuração mais simples com o objetivo de obter resultados satisfatórios na determinação das propriedades hidráulicas de solos parcialmente saturados.

Em seu trabalho, a autora utiliza o algoritmo de otimização de Levenberg-Marquardt e a sua escolha deve-se à sua robustez longe do mínimo e pelo fato de que, quando está próximo do mínimo, os efeitos da não-linearidade são reduzidos. O método de Levenberg-Marquardt, por sua vez, é uma modificação do método de Gauss-Newton e tem sido considerado bastante robusto na solução de problemas de estimativa de parâmetros, os quais ela aprofunda a análise, em seu estudo.

Para a modelagem do ensaio Velloso (2000), utilizou como suporte o programa SWMS_2D (Simunek et al, 1994) desenvolvido pelo U.S Salinity Laboratory, Califórnia, em linguagem Fortran. Sua escolha, deve-se ao fato de o

mesmo utilizar elementos triangulares de carga constante e resolver numericamente pelo método dos elementos finitos, a equação de Richards para fluxo saturado-não saturado, bem como a equação de dispersão-advecção para o transporte de solutos. O modelo de propriedades hidráulicas implementado no programa, é o modelo de Van Genuchten.

A autora optou pelo uso deste programa, pelo fato de se tratar de uma ferramenta de domínio público, de código aberto, o que permite modificações caso sejam necessárias, bem como pelo fato de ser uma ferramenta bastante citada na bibliografia do tema, pela sua utilização na solução de problemas de fluxo e transporte em meios parcialmente saturados (VELLOSO, 2000, p 47-48). De acordo com a autora, o programa se mostrou eficiente em relação ao tempo de cálculo, o que é entendido como muito importante para a solução do problema inverso, uma vez que o mesmo exige um número significativo de cálculos da solução da equação de fluxo.

A autora utilizou os dados do ensaio de Rodriguez (1998) em seu trabalho de mestrado feito no campo experimental II da PUC-Rio, localizado no interior da mesma. O solo do local é caracterizado como um solo coluvionar maduro com tonalidade bruno amarelada, textura argilo-arenosa com poucos seixos de quartzo e lateritas, estrutura granular, aspecto homogêneo, constituindo-se basicamente por quartzo, argilo-minerais (essencialmente caulinita) e óxidos de ferro (VELLOSO, 2000, p. 51). Os ensaios de carga constante, por sua vez, tiveram a duração de cinco dias.

O ensaio utilizado pela autora, consistiu na aplicação de uma carga constante de 1,60m em um furo central e o acompanhamento da variação da sucção por tensiômetros instalados ao redor deste furo central. Na base do furo central, que é revestido por um tubo de PVC, há uma pedra porosa de aproximadamente 40cm de comprimento e mesmo diâmetro do tubo, por onde se dá o fluxo de água. O espaço entre o furo e o revestimento, é preenchido com uma mistura de cimento e bentonita. Para manter a carga constante no furo central foi utilizado o Permeâmetro de Guelph.

Observou-se a partir desses ensaios, que os parâmetros q_r , q_s e k_s , possuem as curvas de sensibilidade bastante semelhantes, indicando assim, a alta correlação entre estes parâmetros. Situação que pode ser confirmada ainda, pela análise das equações do modelo de van Genuchten, onde os parâmetros q_r , q_s estão presentes somente como uma diferença entre eles, $(q_s - q_r)$ e k_s , por sua vez, aparece multiplicando esta diferença

Visto que estes três parâmetros, q_r , q_s e k_s , não podem ser estimados ao mesmo tempo, Velloso (2000, p 57), sugeriu que, tanto q_r como q_s fossem determinados de outra forma (em laboratório, por exemplo). Pois segundo a autora, é bastante importante, que a permeabilidade saturada seja determinada em campo, devido ao efeito de escala.

No que se refere a retroanálise, os parâmetros q_r e q_s foram fixados, já que q_s é um valor próximo, um pouco menor do que a porosidade, que varia de 0,46 a 0,51 e q_r parece bem determinado pela curva característica obtida em laboratório.

O ensaio de carga constante, por sua vez, apresentou um inconveniente no que diz respeito à instalação dos tensiômetros, pois há a necessidade da execução de um furo, da instalação do revestimento de PVC e ainda do preenchimento com mistura de cimento e bentonita. Além disso, o volume de água necessário para o ensaio, é muito grande, tornando o ensaio pouco viável.

Nesse sentido, Velloso (2000), apresentou então, uma proposta de um ensaio de simples instalação para então, analisar a sua aplicabilidade de fato na estimativa dos parâmetros hidráulicos, por meio da retroanálise numérica, conforme ilustrado na Figura 9.

Para isso, o proposto por Velloso (2000, p. 53) foi um ensaio de carga constante também, porém com uma carga menor, de aproximadamente 12cm, o que reduziria o volume de água necessário para o ensaio. E propôs ainda, a utilização de um tensiômetro, que seria portanto, cravado manualmente no solo, dessa forma, a profundidade do tensiômetro não deveria exceder os 20cm.

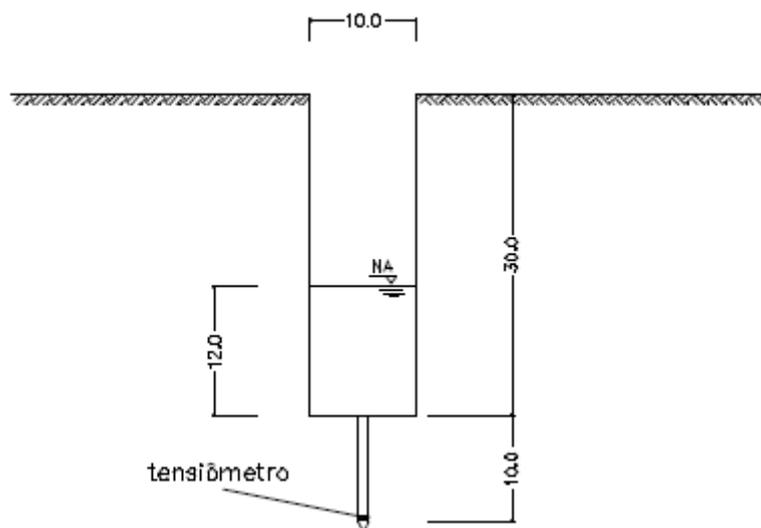


Figura 9 - Ensaio proposto por Velloso (2000).

Com o objetivo de se tentar tornar o ensaio ainda mais viável, para a determinação das propriedades hidráulicas, a autora procurou então, avaliar a possibilidade de se fazer a retroanálise, utilizando somente os dados de vazão no furo ao longo do tempo, o que de fato poderia simplificar a execução do ensaio, dispensando assim, a utilização do tensiômetro.

No que se referem as conclusões obtidas ao final da pesquisa de Velloso (2000), do ponto de vista da implementação numérica, os algoritmos utilizados em seu trabalho, se mostraram eficientes, apesar de não terem sido comparados a outros. A análise de sensibilidade inicial mostrou que, para o modelo de van Genuchten, somente três parâmetros (a , n e k_s) podem ser estimados independentemente. Enquanto, os outros dois (q_r, q_s) devem ser obtidos separadamente.

A retroanálise do ensaio do campo não apresentou bons resultados, segundo a autora, sendo identificadas as razões. Velloso (2000), constatou que a sucção inicial do ensaio realizado, correspondeu a uma condição de umidade alta, e sendo este um ensaio de infiltração (trajetória de umedecimento), um pequeno trecho da curva característica foi considerado suficiente para reproduzir os dados do ensaio. Logo, os dados coletados foram insuficientes para a retroanálise. A interpretação das estimativas pôde auxiliar na determinação da condição inicial necessária para uma estimativa de qualidade.

Através dos estudos numéricos realizados pôde-se observar ainda, que se o ensaio de infiltração for iniciado a partir de uma sucção alta, a retroanálise poderá fornecer assim, resultados satisfatórios. E que, mesmo o ensaio sendo realizado a partir de uma condição de alta umidade, os parâmetros estimados parecem reproduzir, satisfatoriamente, a curva característica e a curva de permeabilidade para sucções menores que a sucção inicial do ensaio. A autora sugere então, que as propriedades obtidas da retroanálise de um ensaio de infiltração, não devam ser extrapoladas para condições mais secas do que a condição inicial do ensaio.

Tendo em vista ainda, que o ensaio realizado por Rodriguez (1998) pareceu pouco prático para a autora, devido à instalação dos tensiômetros e ao volume de água necessário, foi proposto então, um ensaio de configuração simples, sendo capaz de fornecer resultados satisfatórios, como evidenciados.

Dessa forma, a autora concluiu que a metodologia utilizada pareceu bastante útil na retroanálise de parâmetros geotécnicos, com destaque aos parâmetros de fluxo em meio parcialmente saturados. E que, através da análise de sensibilidade, a metodologia empregada pode, também, auxiliar no projeto do

ensaio, indicando a configuração, as condições iniciais e de contorno, os tipos de dados (vazão, carga de pressão, etc.) e a localização dos equipamentos de medida, que forneceriam a melhor estimativa dos parâmetros almejados.

Além disso, concluiu que as retroanálises feitas a partir de dados de vazão, não são capazes de produzir estimativas confiáveis, sugerindo que os parâmetros estimados são correlacionados para este tipo de ensaio. Entretanto, melhores resultados podem ser obtidos quando nos ensaios, a carga de pressão é medida e a função objetivo é dada em termos de carga de pressão (VELLOSO, 2000, p. 44).

Em seu trabalho, Velloso (2000, p 69) recomendou ainda, a implementação de outros modelos de propriedades hidráulicas com a finalidade de se encontrar um modelo em que todos os parâmetros possam ser retroanalizados, com somente um ensaio. Bem como, a execução de um modelo de propriedades hidráulicas que leve em consideração a histerese na curva característica e seu estudo em relação ao problema de identificabilidade. Além do mais, sugeriu a análise de outras configurações de ensaio, incluindo ensaios de laboratório, a utilização da metodologia estudada para a determinação de parâmetros de transporte de contaminantes em solos parcialmente saturados. E ainda, a comparação e a busca de algoritmos de otimização mais eficientes que possam ser necessários em análises tridimensionais.

- **Morales (2008)**

Posteriormente ao trabalho de Velloso (2000), Morales (2008) também teve como foco o EIM. O objetivo da autora, por sua vez, foi a determinação dos parâmetros de fluxo, através da realização do EIM e assim, a realização da análise de fluxo saturado – não saturado em duas encostas, em duas e três dimensões, verificando a variação de fluxo nos casos.

Para tanto, Morales (2008) apresenta os resultados das estimativas para quatro solos: Campo Experimental II, Duque de Caxias, encosta do túnel Rebouças, e a pilha de estéril nº 5 da Mina do Andrade – Bela Vista de Minas. Dessa forma, foram avaliados ensaios de campo e de laboratório, a fim de determinar seu potencial na estimativa de parâmetros e se realizou a análise de sensibilidade de cada um dos parâmetros estimados. Realizou diversos ensaios de campo, utilizando um procedimento simples para a identificação de alguns parâmetros e procedeu a simulação de fluxo saturado – não saturado em dois taludes do Rio de Janeiro.

Em seu trabalho, foi utilizado o programa HYDRUS 2D-3D, desenvolvido por Simunek et al (2006). Tal ferramenta, utiliza o método proposto por Marquardt (1963), o método de Marquardt-Levenberg. O referido método, representa a união entre o método de Gauss-Newton e o Maximo declive. Como a parte da solução inversa, o programa HYDRUS produz uma matriz de correlação que especifica o grau de correlação entre os parâmetros a serem estimados (MORALES, 2008, p, 39).

Para a retroanálise e a simulação de fluxo saturado – não saturado, foram utilizados dados de ensaios de campo em alguns locais, entre eles o campo experimental da PUC – Rio (CEII), que se situa no interior do campus da universidade, na encosta ao lado da estrada Lagoa-Barra. Local onde tem sido realizado uma grande quantidade de trabalhos na área. Destaca-se, que o perfil do solo é composto por um solo maduro colúvionar argilo-arenoso (MORALES, 2008, p 47).

O ensaio em perfil de solo realizado por Morales (2008) em Duque de Caxias, na Rodovia Washington Luís, em direção à Petrópolis, caracterizou-se por ensaios de campo e de laboratório num solo residual jovem de gnaisses da região. A escolha pelo local, deveu-se ao fato de o mesmo apresentar feições ricas em minerais máficos (biotita) e félsicos (feldspatos), conferindo ao mesmo, a respectiva alternância de camadas com porosidade e permeabilidade possivelmente diferenciadas, sendo uma camada mais arenosa e outra mais siltosa. Nunes (2002) realizou ensaios de caracterização do solo para o local, classificando os solos existentes em duas frações: o primeiro um silte-arenoso, com grande percentagem de finos e o segundo como areno-siltoso, sendo 72% da amostra coletada, constituída por areia (MORALES, 2008, p 51).

Outro ensaio realizado pela autora foi na Vista Chinesa, dentro do atual Parque Nacional da Tijuca. Rocha (1993) e Delgado (1993) agruparam os materiais estudados em seis unidades geológico-geotécnicas: colúvionar amarelo, colúvionar vermelho, residual vermelho, residual típico, rocha alterada e rocha sã a levemente alterada. Soares (1999) resumiu as análises granulométricas realizadas por Delgado (1993) e Rocha (1993), observando que o colúvionar amarelo é constituído, em média por 50% de fração areia e 40% de fração argila, possuindo uma pequena percentagem de pedregulho e silte. A determinação das curvas características dos materiais obtidos, foi analisada por Delgado (1993), através de ensaios de placa de pressão e a partir desses dados, determinou-se a curva característica e os parâmetros do modelo de van Genuchten.

O ensaio realizado por Morales (2008, p 57) no Túnel Rebouças, local que atravessa o maciço carioca em dois trechos: o do Rio Comprido ao Cosme Velho, tratando-se de uma encosta de relevo forte ondulado, com inclinação natural variando entre 35° e 40°, expondo vegetação rasteira, espécies arbóreas e lixo. No local, foram feitos ensaios com o objetivo de determinar a condutividade hidráulica saturada com o permeâmetro de Guelph e também se realizou o ensaio de infiltração monitorado. Como parte de sua pesquisa, a autora determinou os valores de condutividade hidráulica saturada de campo, a partir dos resultados do ensaio do permeâmetro de Guelph.

O outro ensaio realizado por Morales (2008, p 57), este na região da Mina do Andrade, em Bela Vista de Minas (Minas Gerais), cujas características básicas, mostram a existência de um primeiro material estéril de itabirito, coletada na superfície da PDE-05, os resultados apresentaram predominância na fração arenosa, sendo classificadas como areaias silto-argilosas de granulometria muito uniforme. E também sendo composto por um residual de xisto com porções de alteração de rocha quartzo feldespato-xisto (MORALES, 2008, p 59).

Foram estimados três dos cinco parâmetros do modelo de van Genuchten, α , n e k_s , e mantidos como fixos os valores de q_s e q_r conforme sugerido por Velloso (2001). Também foi observado, que na retroanálise dos cinco parâmetros produziu-se valores de correlações altas, acima de 0,9, além do que o E.I.M. não fornece dados que permitam a estimação destes (MORALES, 2008, p 67).

Seu estudo mostra ainda, que os valores representam uma baixa correlação, na maioria dos resultados, pois observa-se que a correlação $\rho_{\alpha n}$ é alta nas duas retroanálises. O que significa que existe uma alta dependência entre esses parâmetros, como as outras duas correlações não atingem o valor de 0,9, pode-se dizer que a confiabilidade dos valores estimados está então, garantido.

A diferença existente entre as curvas determinadas em estudo anteriores e os calculados no trabalho, deve-se à estimativa inicial do valor de θ_s usado no estudo, que difere do valor encontrado nos ensaios de laboratório de Soares (2005) e Barros (2004), diferença que pode estar influenciada pela porosidade, já que os ensaios foram feitos em diferentes locais, além da existência da diferença de profundidade entre os ensaios simulados neste trabalho, que foram de aproximadamente de 0,80m com relação aos estudos anteriores.

O trabalho realizado por Morales (2008), teve dois objetivos: a avaliação de um método que permita a estimativa dos parâmetros do modelo de van Genuchten, a partir de alguns dados coletados no campo ou no laboratório. A partir

desta estimativa de parâmetros, a autora objetivou a realização da análise de fluxo saturado – não saturado. No que se refere ao primeiro objetivo, concluiu-se que as expectativas foram satisfeitas, devido ao seu rápido e fácil desenvolvimento no campo, porém com ressalvas quando o solo se encontra muito úmido, pois fornece uma pequena parte de dados da curva característica e ainda a retroanálise pode resultar em valores dos coeficientes de correlação, além do recomendado ou estimativas enganosas.

Tendo como base os ensaios realizados no Campo Experimental II da PUC-Rio, a autora pôde concluir que não existe uma diferença expressiva entre os valores dos parâmetros determinados em laboratório e os estimados. Dos resultados obtidos em Mina do Andrade – Bela Vista de Minas, chegou-se a conclusão de que nas retroanálises dos E.I.M., os valores dos coeficientes de correlação foram baixos, situação que deve-se principalmente ao fato que os valores das cargas de pressão iniciais foram altas, constatando o sugerido por Velloso (2000) que concluiu que para se obter melhores estimativas dos parâmetros, é preciso ter uma maior quantidade de dados, de modo que possa ser simulada a maior parte possível da curva característica.

No que se refere ao ensaio de laboratório proposto por Marinho (2006), a autora concluiu que ainda continua sendo um ensaio de fácil desenvolvimento, porém os seus resultados da retroanálise não são confiáveis, devido aos altos valores dos coeficientes de correlação. Fato que pode ser explicado, uma vez que no início do ensaio se produzem uma grande variação de cargas de pressão, e que o processo de secagem do solo conhecido é dado numa área muito pequena com relação ao solo de parâmetros desconhecidos (aproximadamente 50 vezes maior).

Como sugestão para futuros trabalhos a serem desenvolvidos na área, Morales (2008, p 94), sugeriu a realização de mais ensaios de campo em diversos locais com o foco de se avaliar o método, o modelo e a ferramenta numérica em variados tipos de solos. Ainda, a utilização no ensaio de infiltração monitorada, de uma leitura com TDR, com o propósito de se obter leituras do teor de umidade volumétrica no campo, e ser capaz de realizar retroanálises para mais de um parâmetro. Bem como, uma verificação e revisão dos valores de condutividade hidráulica das encostas estudadas e uma possível realização de ensaios de campo.

- **Pinto (2013)**

No estudo realizado por Pinto (2013), o objetivo foi a obtenção de parâmetros hidráulicos dos solos não-saturados em seis áreas ao longo do Rio de Janeiro e a sua escolha se baseou na rocha de origem formadora dos solos residuais. Os ensaios utilizados por ele, foram o Ensaio de Infiltração Monitorada (EIM) e caracterização física, e para efeitos comparativos também foram executados alguns ensaios de Guelph, papel filtro e permeabilidade saturada triaxial. O modelo de interpretação não-saturado usado, foi o de Van Genuchten-Maulem, e a obtenção de três dos cinco parâmetros, foi realizada através de uma análise inversa.

Nesse sentido, no trabalho de Pinto (2013), é apresentada a campanha de ensaios de campo, cujo objetivo foi determinar as propriedades hidráulicas de solos residuais e ajudar a formação de uma base de dados dos solos do Rio de Janeiro.

O autor esperou com o trabalho, que a metodologia do EIM fosse então, melhor compreendida, comparando-a com resultados de outros trabalhos, seja pelas funções de pedotransferência, por ensaios de campo (permeâmetro de Guelph) ou por ensaios de laboratório (papel filtro e permeabilidade saturada). Para isso, seu trabalho procurou englobar os erros associados e as incertezas do problema inverso (identificabilidade, unicidade, estabilidade e uso de outros algoritmos), a tentativa de simplificar o método (2D para 1D), a visualização do comportamento dos parâmetros obtidos em um perfil de infiltração 1D, assim como, fez considerações quanto às hipóteses do ensaio (relações para fixar θ_s). Por fim, objetivou que os dados obtidos, pudessem alicerçar futuras classificações de solos residuais.

Segundo Pinto (2013), as propriedades hidráulicas dos solos, foram obtidas em campo através do ensaio inverso chamado ensaio de infiltração monitorada (EIM) e restringiu o seu uso a solos com $K_{sat} < 10^{-7}$ cm/s. E, assim como Morales (2008), a ferramenta usada por ele para a retroanálise dos parâmetros, foi o programa Hydrus 2D/3D.

Para a retroanálise, Pinto (2013, p 36), utilizou-o q_r fixo, com valores próximos a 10% de q_s (umidade volumétrica saturada) ou estimados, a partir do programa Rosetta de pedotransferência, que tem como entrada, os valores texturais e de massa específica seca.

O autor propôs três configurações para a acomodação/orientação do tensiômetro: vertical (V), horizontal (H) e radial (R). As dimensões da cava cilíndrica foram, em geral, de 16 cm de diâmetro e altura entre 10 e 30 cm para o uso de uma carga hidráulica que variou entre 5 e 20cm.

Sobre as configurações do posicionamento dos tensiômetros, o autor utilizou as seguintes arbitrariedades: na configuração vertical (V) posicionou-se dentro da cava cilíndrica, em seu eixo de simetria, a cápsula porosa do tensiômetro a uma profundidade entre 10 e 20 cm; na configuração horizontal (H) abriu-se uma cava auxiliar distante de aproximadamente 40 cm da cava cilíndrica, onde é feita a aplicação da carga (usando esse valor como distância mínima necessária a evitar mudança na condição de contorno) e cravou o tensiômetro na berma aberta, de modo que a cápsula porosa ficasse centralizada com o eixo vertical da cava cilíndrica a uma profundidade entre 5 e 20 cm. Por fim, na configuração radial (R) utilizou para a profundidade da cápsula porosa, um valor aproximadamente igual ao da cava cilíndrica e distante radialmente.

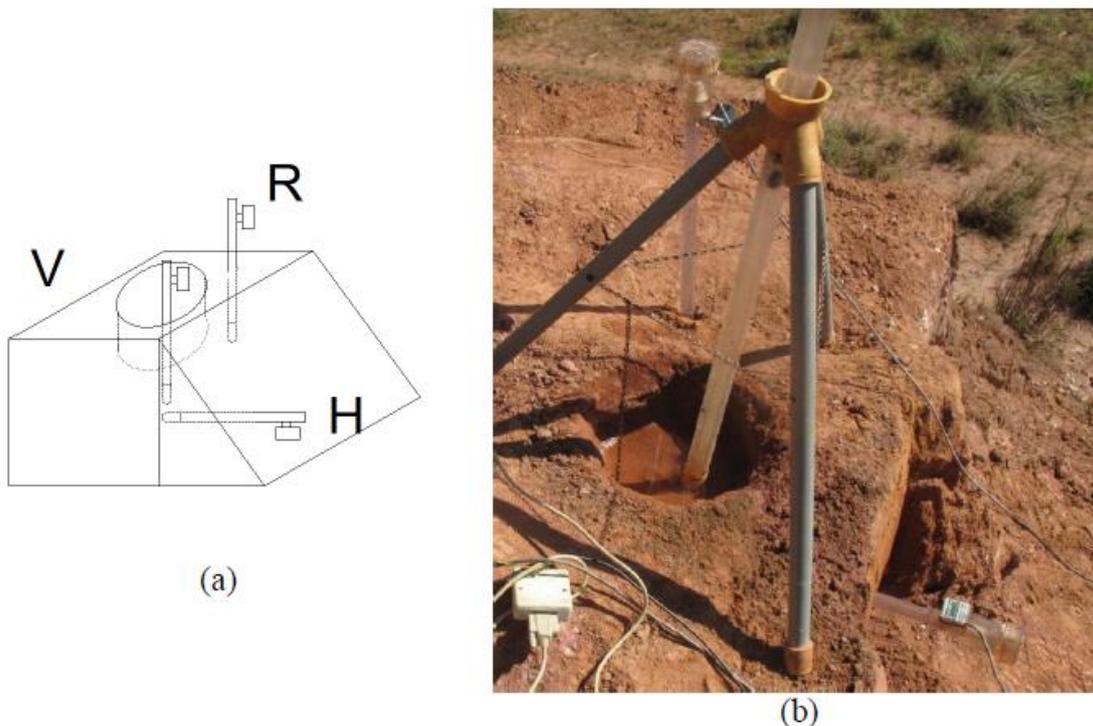


Figura 10 – Configuração de arranjos do tensiômetro utilizado por Pinto (2013).

Pinto (2013) realizou seus ensaios em seis locais: Campo Grande, Costa Brava, Duque de Caxias, Nova Friburgo, Rio Bonito e na PUC. Com apenas 3 ensaios das propriedades hidráulicas em laboratório, sendo 1 de permeabilidade saturada e 2 de papel filtro. As litologias dos solos residuais estudados foram: Biotica Gnaiss, Gnaiss Facoidal, Migmatito (Melanocrático/Leucocrático), Granitóide, Alcalina, Colúvio/Kinzigito (PINTO, 2013, p 49-54).

A partir dos dados obtidos em campo, o autor fez simulações 1D com o programa hydrus 1D com a finalidade de se identificar o comportamento em um perfil pouco espesso comumente encontrado nas encostas do Rio de Janeiro. As condições de contorno e inicial impostas foram; ao topo condição atmosférica com regime de chuva e na base, condição de fluxo zero (impermeável), e ao solo; no caso 1, sucção uniforme de 400 cm e; no caso 2, saturação de 60%.

As conclusões apresentadas por Pinto (2013, p 108) para o seu estudo, foram de que a infiltração é fortemente influenciada pela condição inicial de sucção/umidade no solo, o parâmetro alfa por sua vez, aproxima ou afasta da condição de saturação. No que se refere a análise com condição inicial idêntica, a mesma nem sempre é a melhor comparação entre o comportamento dos solos, uma vez que sofre influência de mais outros parâmetros. A condutividade hidráulica saturada foi entendida por ele, como o parâmetro mais influente na distribuição da umidade ao longo do tempo; tendo em vista que um mês chuvoso produziu poropressões positivas para estes tipos de solo e perfil (200 cm de espessura), porém nem sempre foi capaz de saturá-lo. A chuva de grande intensidade por outro lado, saturou o perfil em poucas horas, mostrando-se a mais perigosa.

Com o objetivo de simplificar o problema nestas configurações em que o tensiômetro é posicionado sob o eixo de simetria, o autor optou por estimar os parâmetros através das análises 2D e 1D e verificou a diferença entre os mesmos. A vantagem da análise 1D em relação à análise 2D (3D axissimétrica) é o custo computacional reduzido, cuja velocidade de processamento é no mínimo 3 vezes mais rápida do que a 2D. Segundo Pinto (2013), p 110), apesar de notória a definição 2D do problema a ser resolvido no EIM, a seção torna-se interessante por mostrar que pouca variação na geometria do ensaio já pode tornar o problema mais próximo ao fluxo 1D e talvez possa facilmente, ser adaptado a esta condição de análise.

Os ensaios de papel filtro (PF) obtidos na literatura (nomeados de PF Oliveira (2013) e PF Maciel (1991) e medidos, foram então plotados junto as curvas obtidas nas retroanálises. Pinto (2013) notou que o valor adicionado da curva característica do ensaio do papel filtro à PF1M1 foi o par de valores (-138150 cm, 0,0197 (-)), que está muito acima da capacidade de observação do tensiômetro, que representa a faixa do ensaio de infiltração monitorada, e que segundo Velloso (2000) e Leong & Rahardjo (1997) era de se esperar que houvesse outra solução ou seja, a mudança nos parâmetros. No entanto, Velloso (2000) esperava que quaisquer conjuntos de parâmetros fornecessem um

resultado confiável para a sucção inferior à condição inicial do ensaio (independente de pontos adicionais). Contudo, acredita-se que a principal causa para isto, possa ter sido o alto valor de correlação entre a e K_{Sat} do ensaio M1 (Tabela 29 e Tabela 30), o que não refuta a hipótese anterior, e sim questiona a qualidade do ensaio.

A técnica do papel filtro utilizada para a obtenção das informações extras para o problema inverso do EIM, foi entendida pelo autor, portanto, como questionável na sua qualidade, tendo em vista que, a precisão da variável dependente, sucção, pode estar associada ao tempo de obtenção da mesma, que neste método (PF) é feita em dias, enquanto no tensiômetro, em segundos (tempo da passagem da frente de infiltração).

Segundo Pinto (2013) este ponto também foi observado em experimentos de infiltração por Simunek, 1999 e Wang et al., 1998, ao constatarem que as leituras dos tensiômetros se estabilizavam antes do conteúdo de umidade (TDRs). Ou seja, poros menores continuavam a receber umidade muito tempo após a passagem da frente de infiltração, subestimando a relação umidade x tensão (observações).

A dualidade de informações faz com que o autor sugira somente a adição de dados relacionados às variáveis obtidas em campo e sob o mesmo equipamento (ex. umidade relacionada à profundidade do tensiômetro ou infiltração acumulada). Pinto (2013), sugere ainda, que devido à quantidade de incertezas, caso se venha a desejar acrescentar informações a priori na solução do problema inverso, que sejam utilizados outros critérios para a tomada de decisão quanto à melhor solução. Esta escolha representa, por exemplo, o uso de funções multi-objetivos com a opção pelo melhor conjunto ao final.

O ensaio de Guelph, para Pinto (2013, 117), mostrou concordante com quase todas as K_{sat} obtidas no EIM, logo o autor chegou à conclusão de que esse ensaio parece suficientemente bom para obtenção deste parâmetro, mas deve-se ter cautela para cada caso, visto que este parâmetro apresenta altos valores de coeficiente de correlação e somente os poucos ensaios do presente trabalho, podem não representar todos os casos. Gribb et al. (2004) ao comparar diversos tipos de ensaio (carga variável, permeâmetro de cone, multi-estágio) concluiu que o permeâmetro de Guelph seria o ensaio que geraria maiores valores de K_{sat} .

Os solos apresentados por Pinto (2013), são em grande maioria, residuais jovens e sua textura é, em geral, areno-siltosa ou arenosa; apresentando pouca ou nenhuma plasticidade. A fração areia varia de acordo com o grau de alteração do solo; quanto mais grossa, menos alterada, existindo, ou por resíduo de veios,

ou por grãos mais resistentes à fração pedregulho. Os locais ensaiados em escala macro, foram heterogêneos, acreditando que o volume ensaiado, possa ter sido considerado como homogêneo, salvo em alguns casos, em que este fato possa ter influenciado o resultado. Solos muito arenosos e sem nenhuma coesão, geraram colapsam da parede do furo, o que possivelmente influenciou nos resultados.

O EIM, quando realizado no período de estiagem, fornece em geral as funções de condutividade hidráulica e curva de retenção de 50 a 90 KPa (média de 57 KPa para o estudo). Pinto (2013, p 120), observou que os valores de sucção estavam de acordo com as condições de campo em outras regiões subtropicais do mundo e do Brasil (Brasil, Vieira & Marinho (2001), Singapura, Lim et al.(1996) e um pouco acima de Hong Kong), e que há maior variação sazonal destes valores nos primeiros horizontes, cuja exposição às condições atmosféricas é maior. Sendo assim, os estudos de perfis de infiltração sugeriram grandes variações de sucção anuais para profundidades rasas, ~0,5, m e alguma variação para profundidades em torno de 1m.

O ensaio foi entendido por ele, como adequado para realizar ensaios pouco profundos de até 1,5 m de profundidade (adaptado com cava lateral) usando uma configuração de ensaio radial. A qualidade do resultado por sua vez, mostrou-se dependente da configuração do ensaio e da condição inicial de umidade de campo, principalmente no que se refere à sensibilidade do ensaio (não foi considerada no estudo à variação espacial de umidade). No aspecto da condição inicial, pode-se dizer que os parâmetros obtidos em curvas de séries temporais começando a baixas sucções resultariam em prováveis grandes erros na estimativa de $\theta(H)$ e $K(H)$ para sucções acima do valor inicial medido.

Sobre a configuração do tensiômetro no ensaio, o posicionamento do mesmo mais próximo ao furo pode diminuir o tempo de ensaio, contudo, irá refletir menos nas condições de heterogeneidade do campo e pode influenciar nos parâmetros obtidos (Gribb et al. 2004). No entanto, o tempo de execução não deve ser considerado o fator preponderante e sim, a geometria, que deve ser definida em função do tipo de solo, e a provável, já que se desconhece as propriedades do solo, sensibilidade no ponto escolhido. Nos solos estudados por Pinto (2013) o tempo máximo de ensaio foi de 7000 s (~ 2 horas) e o mínimo de 80 s (~1,5 min).

No estudo de Pinto (2013, p 122), a orientação R do tensiômetro foi a preferencialmente escolhida pela questão prática, muito embora o posicionamento sobre o eixo do ensaio, V ou H, produza, em geral, melhores coeficientes de correlação. Como questões práticas, se entende evitar o possível fluxo

preferencial na interface tensiômetro/solo, que pode ocorrer no posicionamento V do tensiômetro e o esforço em criar uma berma auxiliar, necessária para o posicionamento H.

Outra vantagem do posicionamento R ou H, percebida por ele, é a possibilidade de reduzir na ordem duas vezes o diâmetro do furo e logo o volume de água necessário, este fato é recomendável para solos mais permeáveis ($K_s K_s$ da ordem de 10^{-3} cm/s) onde o consumo de água é elevado. Diminuir o consumo de água, pode evitar o processo de recarga reservatório, ação que pode produzir bolhas de ar no regime de fluxo, tornando-o descontínuo (Reynolds & Elrick, 1985).

Outro ponto prático, tratado em seu estudo, refere-se à garrafa de Mariotte usada, permeâmetro de Guelph, que se mostrou adequada aos ensaios em encosta por ser entendida por ele, como versátil. No entanto, como não foram utilizados os valores de vazão infiltrada para o EIM, visto que não acrescentam a análise de estimativa de parâmetros tanto no quesito matemático de melhora da solução inversa quanto pela semelhança entre os resultados do cálculo semi-analítico (ex: Reynolds e Elrick, 1985). O autor, propôs, o uso de um reservatório de Mariotte mais adequado e simples. Em termos de simplicidade entendeu-se por custo do equipamento, tempo de montagem e portanto, tempo de execução. Outra vantagem do ensaio, foi o seu caráter semi-automático e, sendo assim, a adaptação do ensaio a outros modelos de garrafa de Mariotte, como exemplo que alimentassem diversos ensaios, o que poderia facilitar a representação de uma área com diversos ensaios simultâneos em batelada (PINTO, 2013, p 122).

Sobre as simulações numéricas, o autor considerou o processo de otimização utilizado na retroanálise tedioso (tentativa e erro), uma vez que a baixa sensibilidade do operador do programa aos parâmetros não saturados, sobretudo por não haver boas correlações dos parâmetros com a textura dos solos, levou a estimativas iniciais longe do conjunto de parâmetros da solução e, que na prática, impossibilitaram/dificultaram a convergência.

Sendo assim, uma forma mais interessante para a retroanálise indicada por Pinto (2013), seria o uso de algoritmos mais poderosos ou o uso de correções, se considerado os dados texturais à estimativa inicial.

As simulações do fenômeno em 1D não foram satisfatórias nesse estudo, pois estão condicionadas à geometria axissimétrica do ensaio, sendo observadas menores diferenças entre a simulação 2D, quanto maior foi a relação Raio/Carga.

Em resumo, o autor observou que nenhuma geometria é de todo preponderantemente melhor do que a outra e que o ensaio por sua vez encontra-

se limitado as mesmas condições de solos que o permeâmetro de Guelph. Todavia, uma orientação dada pelo autor, é de que deve-se evitar o consumo excessivo de água, altos valores dos coeficientes de correlação e poucas informações sobre o ensaio e, ao se adotar esses procedimentos, a configuração H ou mista, se apresenta como a que melhor atende a esses quesitos.

Sobre a adição de outras informações a função objetivo, provenientes de outros ensaios ou de outras formas e grandezas, com o estudo concluiu-se que os dados do papel filtro apesar de produzirem alguns bons resultados, nem sempre deram certeza sobre a melhora na estimativa dos parâmetros. Seja pela grande diferença na curva $\theta(h)$ ou pela incompatibilidade com a curva $H(t)$, que representa o regime de fluxo.

Os valores dos parâmetros α e n retro-analisados no EIM, se encontraram abaixo da média dos valores presentes na literatura para a mesma textura e foram os que apresentaram maiores coeficientes de correlação. Na prática, isto significa que outros parâmetros podem satisfazer a solução, no entanto, acredita-se que a faixa de variação seja pequena para o problema abordado (PINTO, 2013, p 124).

Restando para trabalhos futuros, segundo Pinto (2013), definir qual valor de θ_s deve ser utilizado, podendo ser a porosidade, como no seu trabalho, a porosidade efetiva ou uma outra definição.

Outro problema encontrado no estudo de Pinto (2013, p 125), além da definição teórica do parâmetro θ_s , foi a discrepância com a bibliografia nos valores de porosidade, que foram maiores no presente estudo. Sendo assim, o autor questiona a técnica de anéis utilizada no trabalho para obtenção da porosidade.

Nesse sentido, Pinto (2013, p 125) propõe algumas orientações aos futuros trabalhos sobre o seu tema de estudo. Como por exemplo, que busquem definir melhor o problema inverso, principalmente na questão de unicidade sendo relevantes as considerações sobre adição de informações a priori, tanto em quantidade quanto em qualidade e desenvolver ou utilizar algoritmos mais eficientes (ex: genéticos, redes neurais, EAD) para resolver o problema inverso do EIM.

Além disso, que os futuros trabalhos, comparem a diferença entre a porosidade obtida por diferentes métodos e a relevância da suposição de sua relação com θ_s . Assim como, devem procurar verificar se com informações adicionais, há a possibilidade de se retro-analisar todos os 5 parâmetros do modelo.

Sugere também, que sejam desenvolvidas metodologias ou equipamentos que possam, levar em conta solos com dupla porosidade, que por sua vez, não

são incomuns nos solos brasileiros (caso veja-se a necessidade de trabalhar além de 1000 cm de sucção) e que favoreçam a análise 1D.

Propõe ainda, que comparem o estudo do EIM com ensaios de discos de tensão com instrumentação adaptada (tensiômetros e TDRs) e avaliem então, a diferença entre as cargas positivas e as negativas ao problema inverso.

Sugere assim, que se ampliem a base de dados dos solos residuais do Rio de Janeiro, visualizem a influência de heterogeneidades (umidade inicial, fluxo preferencial etc) no método e por fim, que ao adicionarem novos dados à função objetivo, segundo o autor, é aconselhável também, que sejam aprofundadas suas formas de construção e escolhas de decisão, em casos de multiobjetivo (Merterns (2006) e Wöhling (2008)) (PINTO, 2013, p 126).

3.2. Metodologia do ensaio

A metodologia adotada para a realização dos ensaios apresentados no presente trabalho foram as diretrizes e recomendações anteriormente apresentadas e sugeridas nos trabalhos realizados por Velloso (2000), Morales (2008) e Pinto (2013), e que portanto, estão detalhadas a seguir.

3.2.1. Equipamentos utilizados

Para a realização dos Ensaios de Infiltração Monitorada foram utilizados os seguintes equipamentos, ilustrados na Figura 11:

1. 01 tensiômetro com sensor de pressão de vácuo
2. 01 Permeâmetro
3. 01 sistema de aquisição de dados
4. 02 sensores resistivos de umidade com datalogger
5. 01 notebook
6. Kit de trados
 - a. 01 trado de 4"
 - b. 01 trado caçamba de 4"
 - c. 01 trado parafuso de 3/4"
7. Kit para coleta de amostras indeformadas
 - a. Cápsulas
 - b. Papel filme

- c. Papel alumínio
- d. Sacos herméticos
- e. Caneta permanente
- f. Isopor



Figura 11 – Equipamentos utilizado para a realização dos ensaios

3.2.1.1. Permeâmetro de carga constante

Como parte do objetivo do presente trabalho, foi desenvolvido um permeâmetro de carga constante, mais prático e mais apropriado para a realização do EIM do que o permeâmetro de Guelph. Conforme sugerido por Pinto (2013), o uso de um reservatório de Mariotte mais adequado e simples facilitaria a realização do ensaio, assim como diminuiria o custo do equipamento, tempo de montagem e, portanto, tempo de execução.

Inicialmente este equipamento foi desenvolvido em tubos de PVC de diâmetros de 100 mm e 32 mm, que posteriormente foi substituído por tubos de

acrílico. O controle da carga constante do ensaio é realizado na parte inferior do equipamento, conforme detalhe apresentado na Figura 01C. Além disso, foi adicionado uma válvula de controle para o início do ensaio. Opcionalmente, pode-se automatizar o equipamento, por meio de um sensor de pressão de vácuo instalado no plug superior do permeâmetro.

Conforme apresentado na Figura 12, o permeâmetro desenvolvido é composto pelos seguintes itens:

1. Permeâmetro
 - a. Reservatório de acrílico milimetrado com diâmetro interno de 6,2 cm e área de seção de 30,2 cm²;
 - b. Plug superior (Figura 12 A) com entrada para sensor e sistema de ancoragem e sistema de vedação por O-RINGS;
 - c. Plug inferior (Figura 12 B) com saída para o sistema controlador da carga hidráulica e sistema de vedação por O-RINGS;
 - d. Válvula para controle de início e término do ensaio (Figura 12 B);
 - e. Sistema controlador da carga hidráulica constante em 13 cm (Figura 12 C)
 - f. 3 grampos para ancoragem
2. Transdutor de pressão (Figura 12 A)
3. Sistema de aquisição de dados (Figura 12 D).

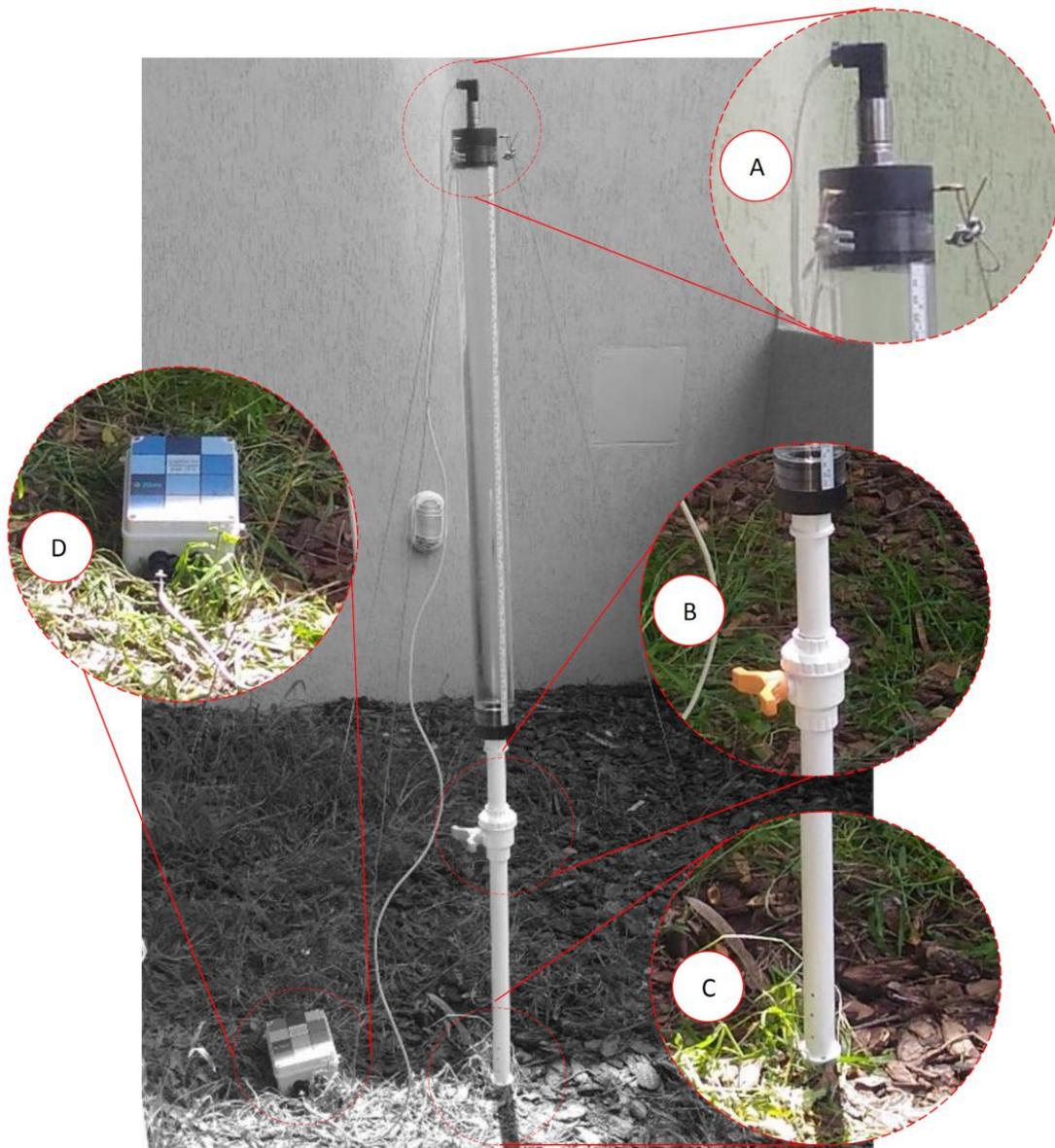


Figura 12 – Visão geral do Permeômetro de carga constante automatizado desenvolvido.

A carga constante é mantida através do sistema ilustrado na Figura 12 C. O princípio de funcionamento deste sistema de controle de carga constante, similar ao utilizado no permeômetro de Guelph, no entanto, não é utilizada a haste prolongadora para submeter a pressão atmosférica na posição desejada. Isto é, o controle da carga constante, é realizado por meio de um orifício localizado na parte inferior do permeômetro. No momento em que a água atinge este orifício, a saída de água do reservatório é cessada. A medida que o nível d'água fora do reservatório decresce, é permitida a entrada de ar pelo orifício de controle e,

consequentemente a saída de água do reservatório pelos orifícios superiores. Desta forma, foi feito o controle da carga constante no furo de sondagem.

Além disso, para se obter a permeabilidade saturada (k_{sat}), foi inserido um transdutor de vácuo para o monitoramento automático do ensaio. Este transdutor foi inserido na tampa superior do permeâmetro, de forma a monitorar a variação do vácuo dentro do reservatório. O valor do vácuo monitorado é correlacionado com a altura de coluna d'água dentro do reservatório, conforme esquema apresentado na Figura 13. A Figura 13 apresenta a variação da pressão hidrostática dentro do permeâmetro e observa-se que no orifício de entrada de ar, a pressão é equivalente a pressão atmosférica e à medida que o nível d'água no reservatório é reduzido, o vácuo aumenta proporcionalmente dentro do reservatório.

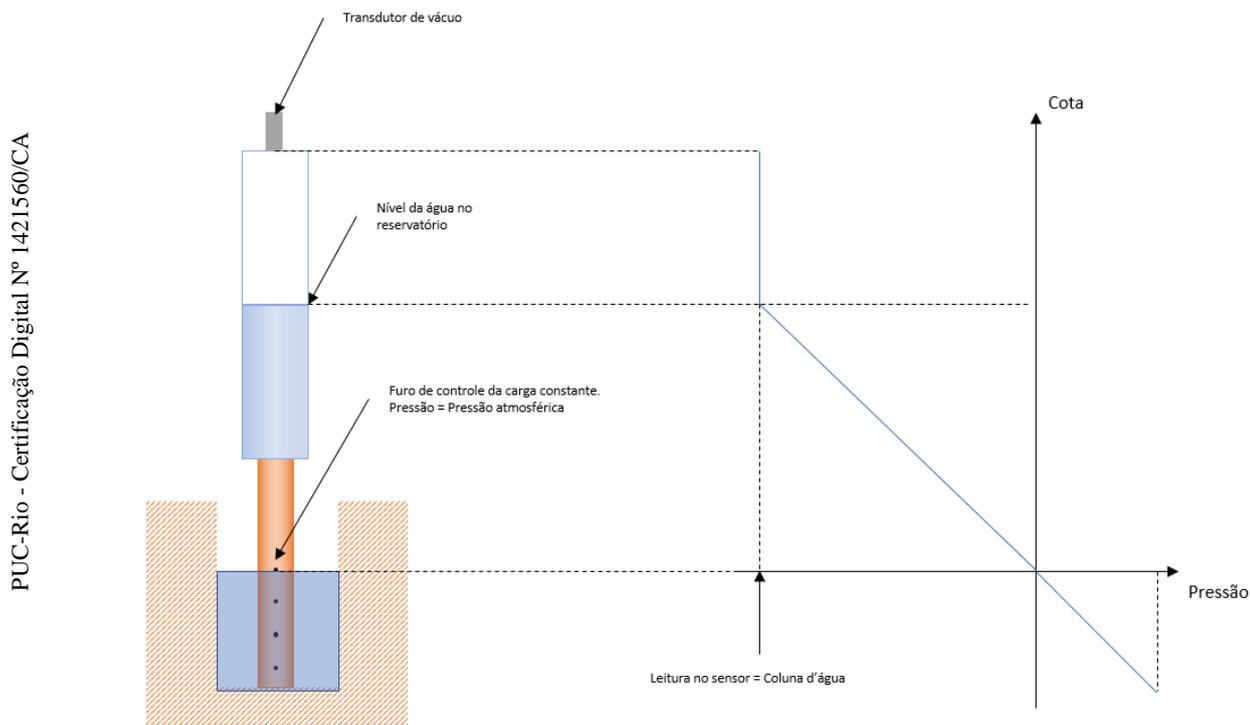


Figura 13 – Desenho esquemático da variação da pressão dentro do permeâmetro de carga constante

Para obter a taxa de infiltração é plotada a curva obtida em cada ensaio em um gráfico que represente o Tempo (em minutos) X Variação do nível no reservatório (em centímetros). A taxa de infiltração corresponde ao coeficiente angular da equação ajustada para Tempo em minutos e variação do nível d'água em centímetros. Logo, para obter a equação de ajuste linear, deve-se utilizar

apenas o trecho onde foi notado regime constante (i.e. variação linear do nível d'água no reservatório), conforme apresentado na Figura 14.

Observa-se na Figura 14, que o trecho inicial do ensaio (linha tracejada vermelha) corresponde ao regime transiente, após a estabilização da infiltração pode-se considerar que a infiltração está em regime permanente (linha contínua vermelha). A equação do ajuste linear, foi obtida para o trecho representado pela linha contínua vermelha e, neste caso como exemplo a taxa de infiltração foi de 23,01 cm/min.

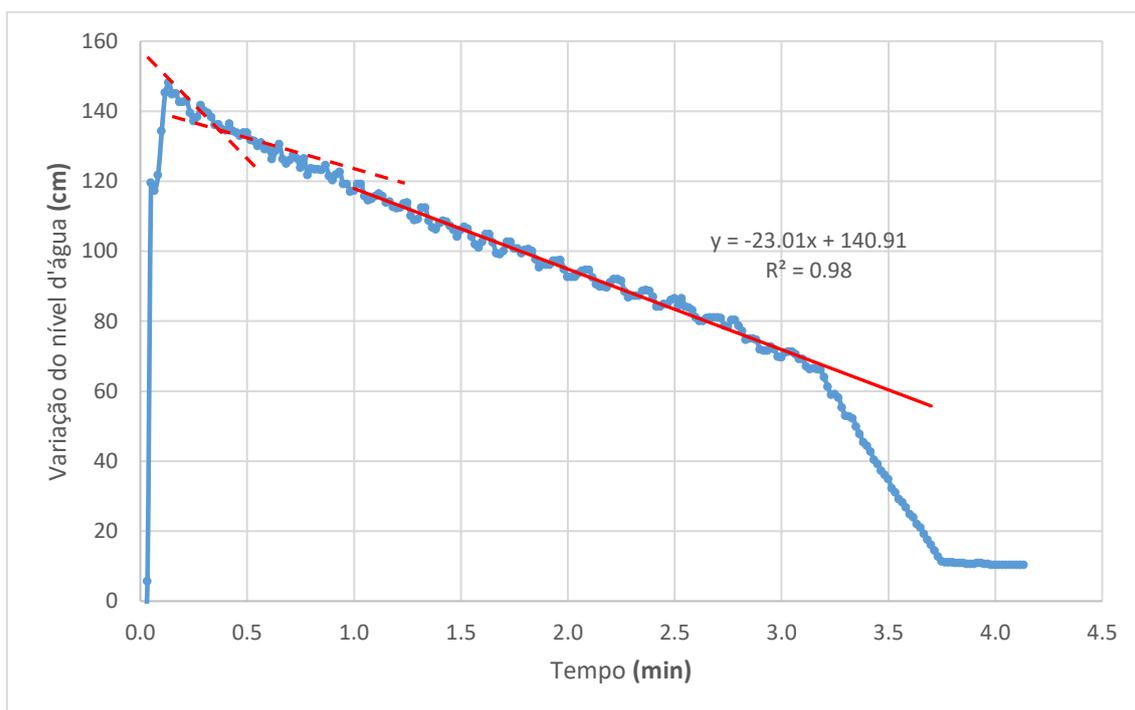


Figura 14 – Determinação da taxa de infiltração através do ajuste linear da curva do ensaio.

Através da curva de estabilização do nível d'água monitorada pelo sensor, pôde-se obter a taxa de infiltração em cm/min, permitindo o cálculo da vazão em fluxo permanente e deste modo, através da Equação 3.1 determinar em seguida, a permeabilidade saturada.

A permeabilidade pode ser obtida através da seguinte equação, conforme Reynolds (1993):

$$K_{sat} = \frac{C \times Q}{2\pi H^2 + \pi a^2 C + 2\pi \left(\frac{H}{a}\right)} \quad (3.1)$$

Onde,

- K_{sat} é a condutividade hidráulica (cm/s);
- C é o fator forma, calculado conforme apresentado na Tabela 01 e definido por Zang et al. (1998);
- Q é a vazão em fluxo permanente em cm^3/min . Este valor é obtido pela multiplicação da área da seção do permeâmetro ($30,2 cm^2$) pela taxa de infiltração obtida em cada ensaio (cm/min);
- H é a carga constante imposta no ensaio (cm). O permeâmetro utilizado aplica uma carga hidráulica fixa de 13 cm;
- a é o raio do furo do ensaio em cm.

O fator forma (C) depende da classe textural-estrutural do solo e pode ser determinado conforme definido por Zang et al. (1998).

3.2.1.2. Sensores capacitivos de umidade de solo - FDR

Foram utilizados sensores do tipo FDR (Reflectometria no Domínio da Frequência). Estes sensores são baseados no princípio da reflexão, no entanto, essas medidas e observações são feitas no domínio da frequência (Araújo, 2004).

Os sensores são constituídos de um par de eletrodos, que se comportam como um capacitor eletrônico, resultando em valores de frequência que dependem da capacitância do solo. Deste modo, uma maior capacitância resulta numa maior umidade do solo e menor frequência do circuito (Cruz, 2013).

Foi necessário realizar adaptações nos sensores, de forma a melhorar e facilitar a cravação dos mesmos no solo. Para isto, os sensores foram parafusados à tubos de PVC de 25 mm, ficando mais rígidos e de fácil manipulação, conforme ilustrado na Figura 15.



Figura 15 – Adaptação feita nos sensores de umidade do solo.

Destaca-se, ser necessário realizar a calibração do sensor para cada solo ensaiado. De acordo com Kinzli, Manana e Oad (2012), a calibração de sensores de capacitância consiste na medição da capacitância no solo, variando-se o teor de umidade. Posteriormente, são obtidas então, as equações de calibração. Segundo Pizzeta (2015), este método tem sido bem sucedido para vários sensores capacitivos em laboratório e em nível de campo, conforme relatado por Seyfried & Murdock (2004), Veldkamp & O'Brien (2000), Geesing et al (2004), Walker, Willgoose & Kalma (2004).

A curva de calibração dos sensores foi obtida para cinco pontos de umidade volumétrica para cada ensaio, sendo utilizadas as amostras indeformadas coletadas no local dos ensaios, em anéis de 2,56 cm de altura por 5 cm de diâmetro. A umidade das amostras foi corrigida pelo grau de Saturação (S) para 5 (cinco) pontos, sendo eles: 5%, 25%, 50%, 75% e 90%. Posteriormente, o solo foi retirado dos anéis e embalados com papel filme para a inserção do sensor

lateralmente ao corpo de prova Figura 16. Após a estabilização das leituras, a umidade das amostras foi determinada pelo método gravimétrico.



Figura 16 – Procedimento de calibração dos sensores de umidade.

Conforme observado na Figura 17 que apresenta exemplo da curvas de calibração dos sensores, o comportamento das leituras (em bytes) tendem a apresentar valores menores quando a umidade volumétrica do solo aumenta, ou seja, ajuste linear decrescente, conforme contatado também por Pizzeta (2015).

Observa-se que a calibração para todos os ensaios foi excelente, apresentando um R^2 maior de 0,90 para todos os locais.

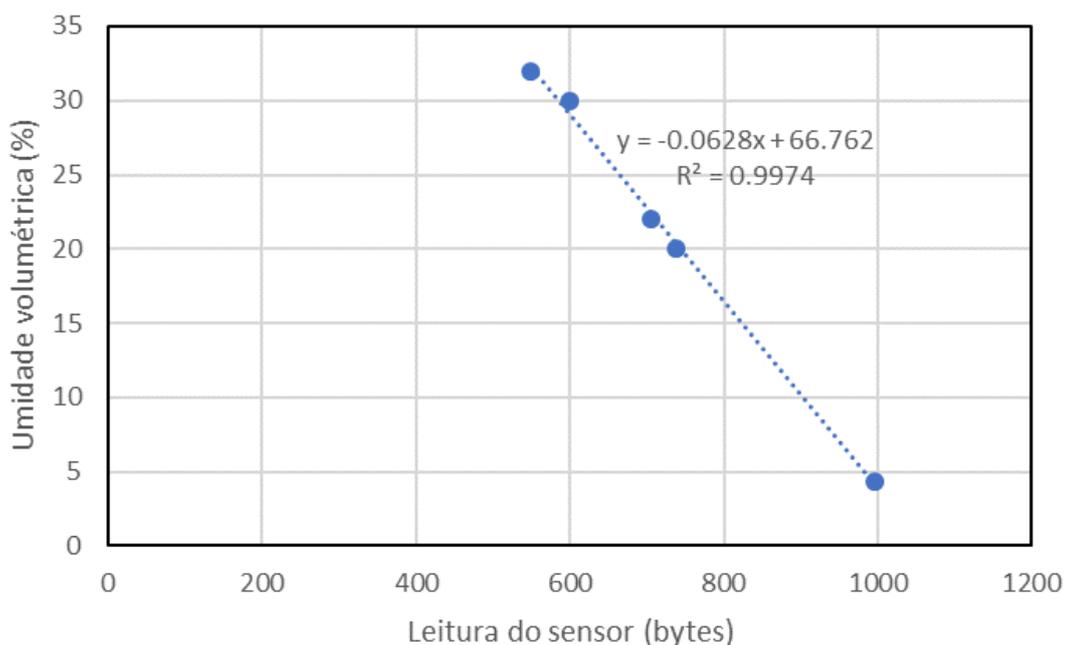


Figura 17 – Exemplo de curva de calibração dos sensores de umidade.

3.2.2.Procedimentos do ensaio

Os procedimentos realizados nos ensaios, foram previamente padronizados, com base nas orientações descritas nos estudos anteriores (Velo, 2000, Morales, 2008 e Pinto, 2013), de forma a garantir a mesma qualidade em todos os ensaios executados.

Foi utilizado a geometria apresentada na Figura 18, sendo instalado o tensiômetro na posição vertical (V) sobre o eixo de simetria do furo. Segundo Pinto (2013), esta geometria do ensaio apresentou melhores coeficientes de correlação quando comparado com a posição radial (R) e não é necessário a execução de uma berma como necessário na posição horizontal (H). Como desvantagem desta geometria, pode-se destacar o maior uso de água, segundo Pinto (2013).

Nos ensaios realizados em solo residual, foram utilizados além do tensiômetro, também, sensores de umidade de solo. Foram testadas duas geometrias distintas, conforme apresentado na Figura 18. A primeira foi mantida a posição do tensiômetro na posição central do furo e o sensor de umidade foi inserido 10 cm abaixo do mesmo, através de um furo horizontal. Na segunda (Figura 18.b), o sensor de umidade e o tensiômetro foram instalados em posições diametralmente opostas, tendo em vista que, por ser um problema axissimétrico, foi considerado o teor de umidade e a sucção no mesmo ponto do modelo. Nesta segunda configuração, foi mantido o sensor de umidade 10 cm abaixo do tensiômetro e sobre o eixo de simetria do furo.

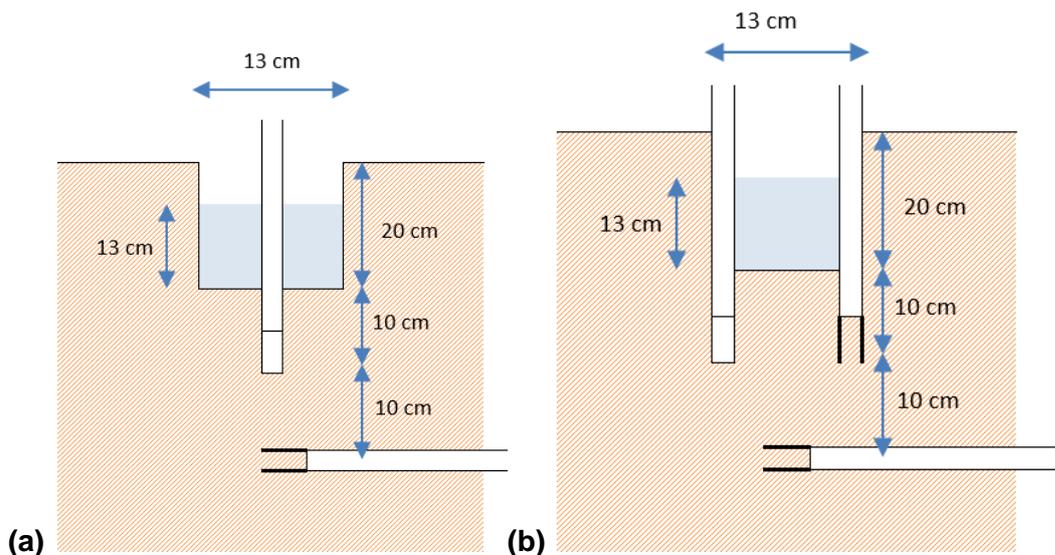


Figura 18 – Geometria do ensaio utilizando sensores de umidade na posição (a) diametralmente oposta ao tensiômetro e horizontal e (b) apenas horizontal.

A execução do ensaio foi sistematizada em 6 (seis) etapas, distribuídas em:

Etapa 01- Preparação do terreno

- Planificação e limpeza do terreno no local onde será realizado o ensaio;
- Realizar o furo com o auxílio de um trado de 4" até uma profundidade de aproximadamente 20 cm;
- Limpeza e preparação do furo de 4" com o trado caçamba;
- Fazer o furo de 3/4" com o trado parafuso no centro do furo de 4" até a profundidade estipulada;
- Coletar a amostra que saiu no trado para determinação da umidade inicial do ensaio;
- Anotar as dimensões finais do ensaio

Etapa 02 - Preparação do tensiômetro

- Configurar o datalogger para iniciar a leitura do tensiômetro;
- Instalar o tensiômetro no furo de 3/4", certificando que ele chegou até o fundo do furo, o tensiômetro deve entrar bem justo no furo para que se tenha um bom contato com as paredes do furo (Figura 19);
- Compactar manualmente o entorno do tensiômetro;

- d. Programar o dataloggers e inicial a leitura do tensiômetro;
- e. Verificar a leitura inicial do tensiômetro até a sua devida estabilização (aproximadamente 30 minutos);



Figura 19 – Preparação do terreno e instalação do tensiômetro.

Etapa 03 – Montagem do permeâmetro

- a. Posicionar a base do permeâmetro dentro do furo executado e próximo ao tensiômetro.
- b. É necessário ter cuidado ao fixar o permeâmetro dentro do furo, de forma a não exercer esforço lateral ao tensiômetro, o que pode ocasionar a quebra da pedra porosa.



Figura 20 – Montagem final do ensaio em terreno plano.



Figura 21 – Preparação final do ensaio com execução de berma.

Etapa 05 - Início do ensaio

- c. Verificar se a leitura do tensiômetro estabilizou;

- d. Caso estabilizado, iniciar o ensaio;
- e. Abrir a válvula do permeâmetro para aplicar carga constante.



Figura 22 – Detalhe do enchimento do furo.

Etapa 06 - Término do ensaio

- a. Acompanhar as leituras do tensiômetro até que estas estejam, próximas de zero, conforme ilustrado na Figura 23.

Etapa 07 - Coleta de amostras indeformadas

- a. Coleta das amostras indeformadas para determinação da porosidade e realização de ensaio de papel filtro.
- b. Armazenar as cápsulas em saco plástico hermético devidamente identificado, e posteriormente em um isopor

Após o término do ensaio, recomenda-se uma checagem para aprovação ou rejeição dos dados para avaliar a necessidade da realização de outros ensaios. Uma curva típica do ensaio está apresentada na Figura 23, onde está ilustrado em vermelho a variação da sucção monitorada pelo tensiômetro e em verde a variação da coluna d'água no permeâmetro.

Observa-se na Figura 23 que a estabilização do tensiômetro, pode ser constatada através da estabilização das leituras, momento em que pode ser realizada a abertura da válvula do permeâmetro. O início do ensaio pode ser

constatada na curva do ensaio pelo momento em que é aberta a válvula do permeâmetro.

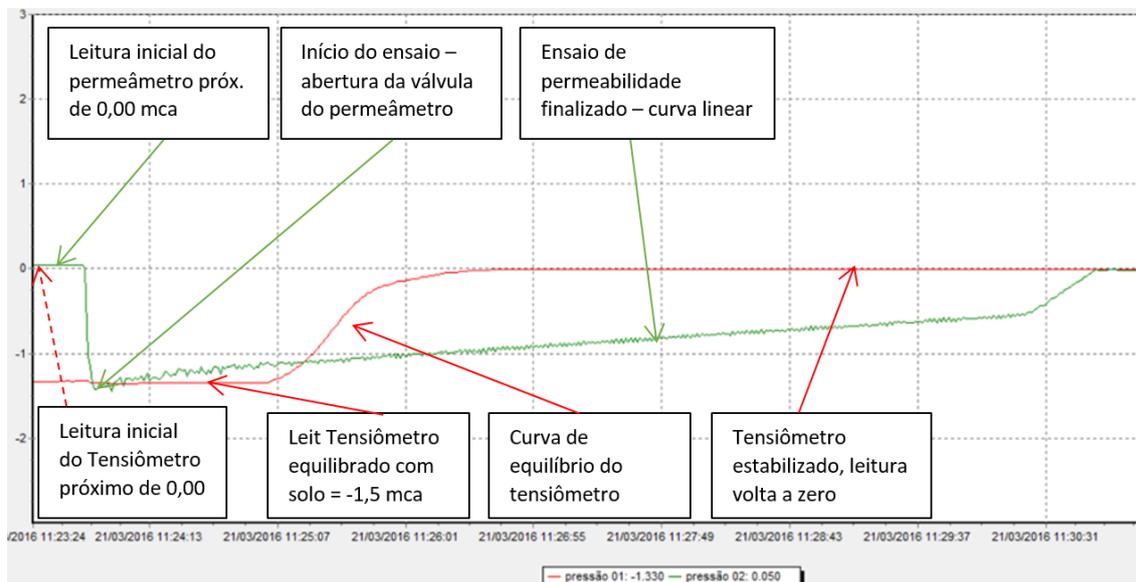


Figura 23 – Curvas típicas do Ensaio de Infiltração Monitorada, sendo em vermelho a variação da sucção monitorada pelo tensiômetro e em verde a variação da coluna d'água no permeâmetro.

3.3. Ensaio de campo

Os ensaios realizados foram realizados em solos residuais com o objetivo de realizar análise comparativa com resultados de ensaio de papel filtro utilização de sensores de umidade, utilização de métodos de otimização alternativos ao de Levenberg-Marquardt, sendo realizados 6 (seis) ensaios.

3.3.1. Localização e descrição dos EIM realizados em solos residuais

Para a realização dos ensaios em solo residual, buscou-se locais onde houve corte de taludes e, desta forma, expondo o solo residual a ser estudado. Foram realizados um total de 6 (seis) ensaios em solo residual, sendo dois em solo residual maduro de alteração de Hornblenda Biotita Ganaisse em Rio das Ostras, outros três realizados em solo residual correspondente à alteração de Gnaisse facoidal nos municípios de Niterói e São Gonçalo, por último, um colúvio em Itaboraí.

A realização do primeiro ensaio em solo residual, auxiliou na escolha da localização e tipo de solo a ser estudado nos ensaios seguintes. Pois, no primeiro

ensaio realizado, em Rio das Ostras, foi constatado pelo tensiômetro uma sucção inicial superior a 80 kPa (800 cm). Tendo em vista que este valor é muito próximo ao valor de entrada do ar da pedra porosa utilizada, foi coletada uma amostra indeformada para determinação da sucção inicial. Feito isso, foi notado que este valor ultrapassou 200 kPa (i.e. muito superior ao valor de entrada de ar da pedra porosa), estando as leituras iniciais do tensiômetros erradas.

Debruçando-se inicialmente com este obstáculo prático, optou-se portanto, pela realização dos ensaios seguintes, em solos mais arenosos e com menores valores de sucção inicial. Para tanto, foi desenvolvido um sensor de umidade com o objetivo de monitorar os valores de umidade em solos com sucção inicial acima do valor de entrada de ar da pedra porosa.

3.3.1.1. Hornblenda Biotita Gnaiss - Rio das Ostras

O ensaio realizado no município de Rio das Ostras-RJ, conforme apresentado no mapa geológico do Estado do Rio de Janeiro (CPRM, 2000) da Figura 24, indica que o local do ensaio está inserido no complexo Região dos Lagos. O Complexo Região dos Lagos é descrito na literatura (CPRM, 2000, Viana et al., 2008) como constituído por ortognaisses bandados/migmatíticos, cinzentos, de composição tonalítica a granítica, com predominância de composições graníticas, associados à corpos anfibolíticos variavelmente deformados. Segundo Viana et al. (2008), os ortognaisses, possuem variações mineralógicas e texturais que permitem subdividi-los em três subtipos: hornblenda-biotita gnaiss, leucognaiss e biotita gnaiss.

O hornblenda-biotita gnaiss é o litotipo de maior predomínio dentro do complexo Região dos Lagos e ocorre intercalado com o biotita gnaiss, em menor proporção.

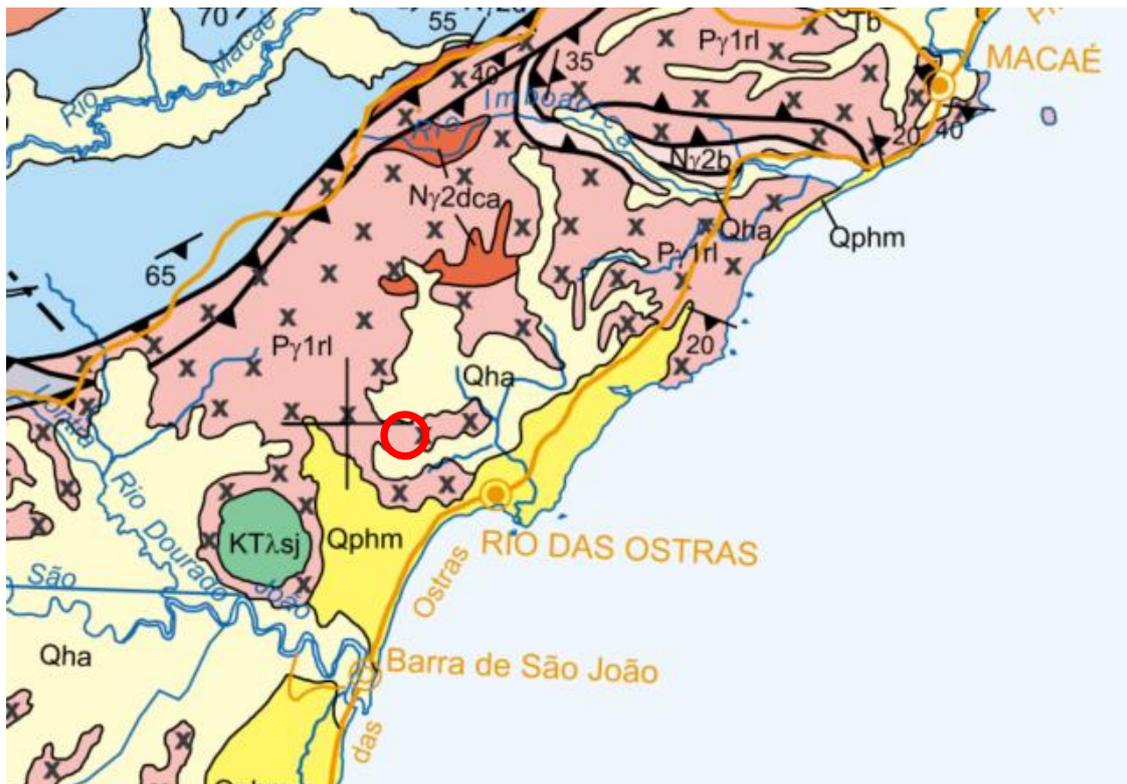


Figura 24 – Recorte do mapa geológico do Estado do Rio de Janeiro em escala 1:500.000. O local do ensaio está destacado pelo círculo vermelho.

Tendo em vista que não foi encontrado afloramento da rocha mãe nas proximidades do talude escavado, supõe-se, pelos minerais presentes no solo residual local, que a rocha mãe seja o hornblenda-biotita gnaiss, tendo em vista que não se observa uma grande quantidade de biotita no solo de alteração. Na porção do perfil de alteração que estava exposto na ocasião da visita técnica de reconhecimento, foi possível observar um solo residual maduro na porção superior, com espessura de cerca de 2 metros e o solo residual jovem, de textura areno siltosa vermelho claro com manchas brancas. É possível identificar também, minerais de quartzo, mica-muscovita e caolinita. As amostras de solo apresentam aspecto sedoso ao toque, sugerindo a presença de mica alterada na fração siltosa.

Do ponto de vista geológico geotécnico, foi identificada apenas uma unidade principal homogênea, sendo ela:

- Areia fina siltosa de coloração vermelha, solo residual local – hornblenda-biotita gnaiss do Complexo Região dos Lagos;

A Figura 25 apresenta o perfil de alteração do solo estudado, sendo a linha tracejada branca representa o perfil de alteração identificado, onde o solo residual

maduro está acima da linha tracejada, enquanto que o solo residual jovem está abaixo da linha tracejada. O solo foi realizado no solo residual jovem, localizado na berma de equilíbrio entre os dois taludes. Foram realizado dois ensaios, sendo estes denominados de BG-01 e BG-02.

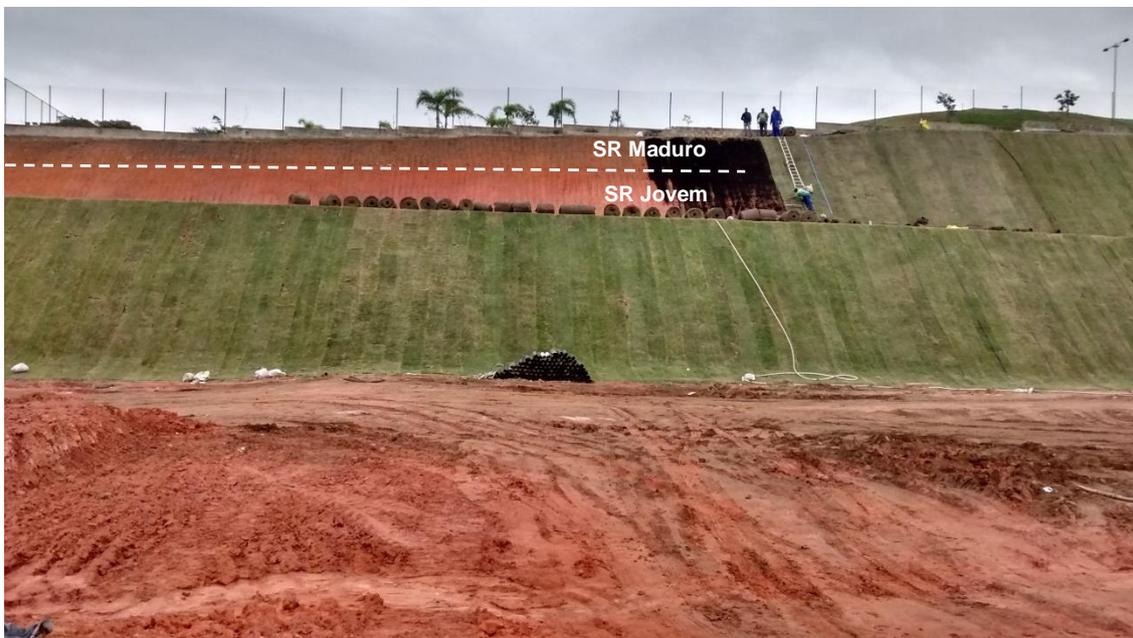


Figura 25 – Identificação visual do perfil de alteração do solo residual, identificado pela linha tracejada.

3.3.1.2. Gnaisse Facoidal - Niterói e São Gonçalo-

Foram realizados três ensaios em solo de alteração de Gnaisse facoidal, sendo um deles no município de Niterói e os outros dois no município de São Gonçalo. O Gnaisse facoidal é o litotipo de maior predominância nos municípios de Niterói, conforme pode ser constatado no recorte do mapa geológico do Estado do Rio de Janeiro (CPRM, 2000). A

Destes três ensaios, dois foram executados em um Solo residual jovem (São Gonçalo) e o terceiro em um Solo Residual Maduro (Niterói), sendo eles denominados de, respectivamente, GF-01-J, GF-02-J e GF-03-M.

As Figura 27 ilustra o perfil do solo e o grau de alteração dos ensaios GFJ-01 e GFJ-02. A Figura 28 apresenta o perfil do solo residual maduro

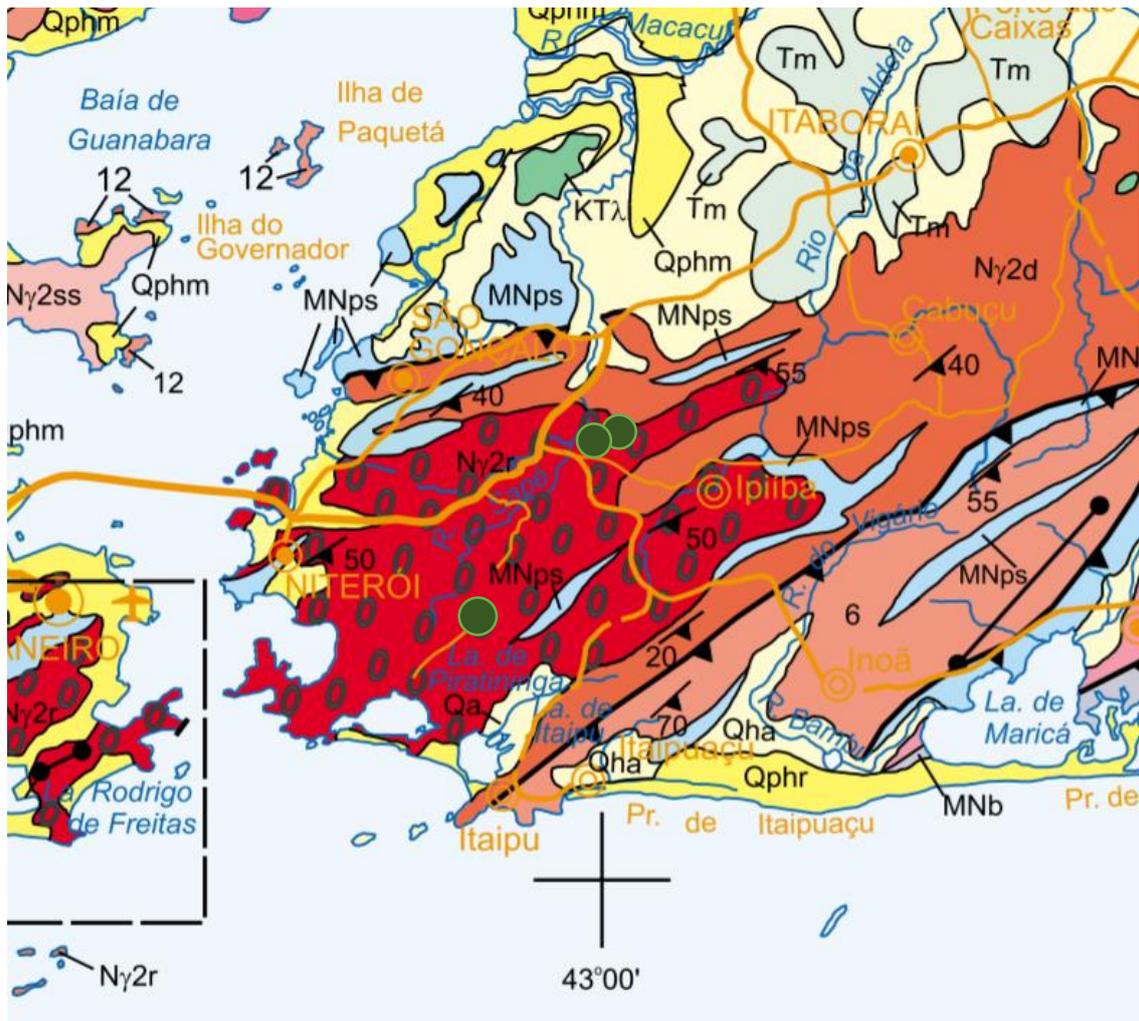


Figura 26 – Recorte do mapa geológico do Estado do Rio de Janeiro, com a indicação do local ensaio realizados.



Figura 27 – Detalhe do solo residual jovem GFJ-01 em São Gonçalo, com presença de minerais pouco intemperizados.



Figura 28 - Detalhe do solo residual maduro realizado em Niterói, denominado de GFM-01.

O ensaio para a determinação da curva característica através do papel filtro foi realizado conforme as orientações descritas na norma internacional ASTM D 5298-94 (1998). O procedimento consiste em colocar um papel filtro em contato com a superfície da amostra do solo até que o equilíbrio de sucção total seja estabelecido. O valor da sucção é obtido através da curva de calibração do papel filtro. No presente trabalho foi utilizado o papel filtro Whatman nº 42. Deste modo, os ensaios resultaram em pontos de pressão versus umidade, que foram ajustados pelo modelo de van Genuchten, com o auxílio do programa RETC, desenvolvido pela PC-PROGRESS.

4 Estimativa de parâmetros

No presente estudo, a estimativa de parâmetros foi realizada através da retroanálise, i.e. através da resolução de problemas inversos.

A Figura 30 apresenta um fluxograma ilustrativo da estimativa de parâmetros, através de problemas inversos. Ao contrário do modelo direto, o referido modelo inverso, tem como entrada do modelo, os dados observados em campo (efeitos) e, por sua vez, como saída, os parâmetros desejados (causas). O problema físico pode ser resolvido através de equações analíticas ou métodos numéricos, sendo validado através de algoritmos de otimização. Segundo Engl et al. (1996), em suma, a resolução do problema inverso, consiste em determinar causas desconhecidas, a partir de efeitos observados.

Em geral, os algoritmos de otimização, podem ser classificados em métodos de otimização de pesquisa locais e globais (Cheng, 2014). Os métodos de busca locais, como o de Levenberg-Marquardt, geram o conjunto de parâmetros candidatos em torno dos valores iniciais dados pelos usuários, dos quais a vantagem é a alta taxa de convergência. No entanto, o resultado da calibração do algoritmo de busca local pode facilmente pesquisar apenas no entorno de um ótimo secundário, não atingindo o valor ótimo propriamente dito.

Por outro lado, algoritmos de busca global podem gerar aleatoriamente o conjunto de parâmetros candidatos e livrar-se do impacto dos valores iniciais, e atingindo, de fato, uma distribuição probabilística dos valores ótimos. Dentre os métodos de otimização global disponíveis, foi avaliado o Algoritmo Evolução Diferencial Adaptativa de Metropolis (DREAM) que, por sua vez baseia-se na teoria da simulação de Monte Carlo via Cadeia de Markov (MCMC).

Deste modo, através dos dados monitorados em campo durante o EIM ($h(t)$ e condições de contorno) e utilizando soluções analíticas (obtidas através da Regressão Polinomial Evolucionária), numéricas (software HYDRUS) e algoritmos de otimização (DREAM e Levenberg-Marquardt), foram então obtidos, os parâmetros hidráulicos do solo.

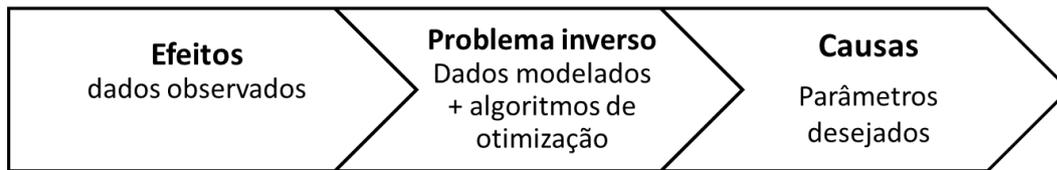


Figura 30 – Diagrama resumido para determinação de parâmetros em problemas inversos (adaptado de Velloso, 2000).

Estudos anteriores que tiveram como foco o EIM (Velloso, 2000, Morales 2008, Pinto, 2013) utilizaram, em sua totalidade, o método de otimização de Levenberg-Marquardt. Neste trabalho, objetivou-se por sua vez, a utilização de outros métodos de otimização, que, sejam capazes de fornecer os valores ótimos parâmetros analisados, a distribuição estatística e a incertezas dos parâmetros obtidos.

Desta forma, os dados monitorados em campo através do EIM, foram retroanalisados por dois algoritmos de otimização, sendo eles:

- Levenberg-Marquardt - já implementado e comercializado pela PC-Progress pelo software HYDRUS 2.05; e
- Algoritmo Evolução Diferencial Adaptativa de Metropolis (DREAM), disponibilizado gratuitamente em formato do software Matlab através do endereço eletrônico ¹ da Universidade da Califórnia Irvine pelo professor associado Ph.D Jasper Vrugt.

O DREAM, por sua vez, foi utilizado de duas formas, sendo a primeira através da otimização de um modelo substituto obtido através do método de Regressão Polinomial Evolucionária – EPR (Giustolisi & Savić, 2006) e a segunda, juntamente com o software HYDRUS 2.05.

4.1.Revisão bibliográfica - Otimização dos parâmetros

A otimização de parâmetros é uma abordagem indireta para a estimativa dos parâmetros hidráulicos de solos não saturados. Segundo Simunek et. al (2012), métodos inversos são, tipicamente baseados na minimização da função objetivo desejada. As propriedades hidráulicas do solo, são adotadas para descrever um modelo analítico com parâmetros desconhecidos. A resposta do sistema é representada por uma solução numérica da equação de fluxo,

¹ <http://faculty.sites.uci.edu/jasper/software/>

umentada com as funções hidráulicas parametrizadas, parâmetros de transporte selecionados e condições desejadas iniciais e limites.

Em geral, a estimativa inicial dos parâmetros otimizados é iterativa e melhorada durante o processo de minimização até o estágio desejado da precisão obtida. Por outro lado, podem existir problemas de não unicidade ou não identificabilidade dos parâmetros calculados, tendo em vista que é um algoritmo de busca local.

Por outro lado, a abordagem bayesiana propõe estimar a distribuição da incerteza dos parâmetros do modelo, em vez de apenas procurar o conjunto de “parâmetros ótimos”, e desta forma estimar as distribuições posteriores dos parâmetros do modelo (Beven e Binley, 2013). Este método é utilizado para a inferência Bayesiana de problemas de simulação numérica, sendo baseado na teoria da simulação de Monte Carlo via Cadeia de Markov (MCMC).

O presente estudo, utilizou o algoritmo de otimização de Levenberg-Marquardt, já implementado no software HYDRUS e amplamente utilizado nos estudos pretéritos do EIM. Foi utilizado também o algoritmo Differential Evolution Adaptive Metropolis - (DREAM), implementado por Vrugt (2016) no software MatLab, sendo elaborado no presente estudo *scripts* complementares para a execução em paralelo com o software Hydrus 2.05 e com as soluções analíticas obtidas através da EPR.

4.1.1. Levenberg-Marquardt – Hydrus

A minimização da função objetivo realizada pelo software Hydrus 2.05 é feita utilizando o algoritmo de otimização de Levenberg – Marquadt. Segundo Velloso (2000), esse método pode ser visto como uma interpolação entre o método do máximo declive e o método de Gauss-Newton, sendo a estimativa de parâmetros gerada em intervalos de confiança.

A Figura 31 apresenta um fluxograma das etapas para a estimativa de parâmetros utilizando algoritmos de otimização como o de Levenberg-Marquardt. Como parte da solução inversa, é necessário avaliar a matriz de correlação, que especifica a correlação entre coeficientes ajustados. Segundo Simunek et. al (2012), a matriz de correlação, quantifica as mudanças nas predições do modelo causadas por pequenas mudanças na estimativa final de um parâmetro particular, relativa a mudanças similares como resultados de mudanças em outros parâmetros. A matriz de correlação por sua vez, reflete a não ortogonalidade entre

os dois valores parâmetros. O valor ± 1 sugere a alta correlação, onde 0 (zero) indica ausência de correlação

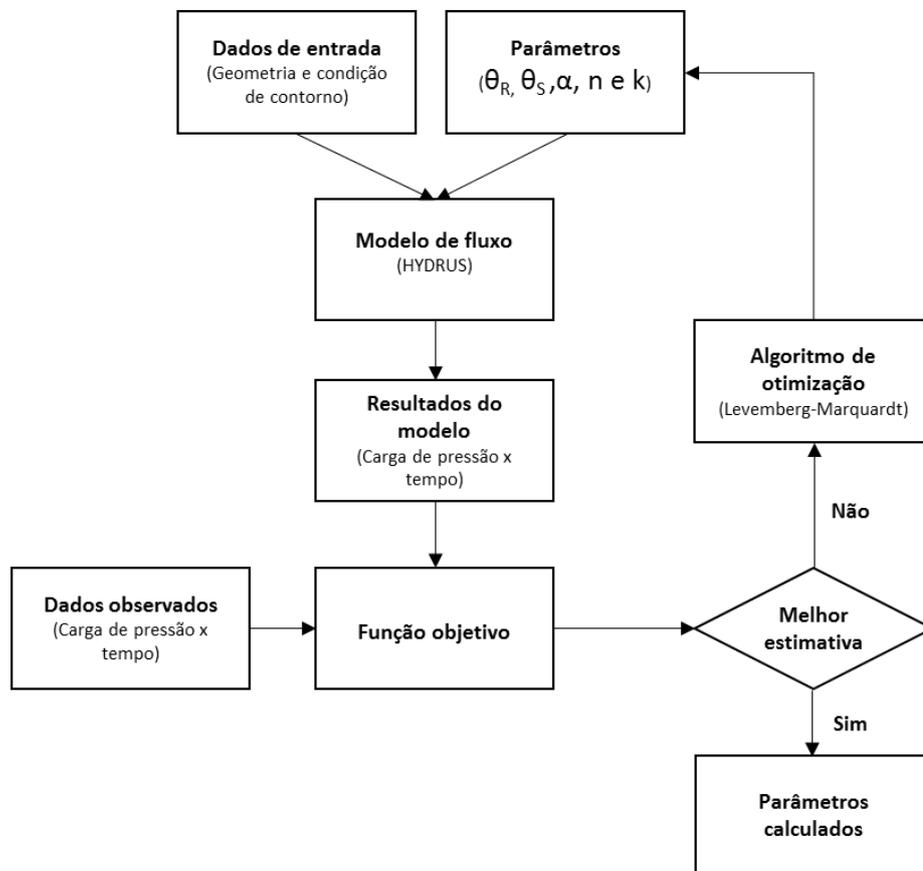


Figura 31 – Fluxograma para resolução de problemas inverso utilizando o software HYDRUS com o algoritmo de otimização de Levenberg-Marquardt (adaptado de Cheng, 2014).

Devido a possíveis problemas relacionados as singularidades da convergência e parâmetro, Simunek et. al (2012) sugere reforçar as retroanálises de forma repetida, com diferentes parâmetros iniciais estimados, para verificar então, se o programa de fato, converge ao mesmo mínimo global na função objetiva.

4.1.2. Inferência Bayesiana - DREAM

Segundo Vrugt (2016), o objetivo da inferência bayesiana, é sintetizar a distribuição posterior. Quando esta tarefa não pode ser realizada por métodos analíticos ou por aproximação analítica, os métodos de simulação de Monte Carlo podem ser usados para gerar uma amostra, a partir da distribuição posterior.

Segundo Cheng (2014) o DREAM é superior a outras abordagens de amostragem do tipo MCMC (Markov Chain Monte Carlo) considerando problemas de otimização de alta dimensionalidade e multimodalidade, pois este algoritmo tem como base, o algoritmo *Differential Evolution Markov Chain* (DE-MC) que executa múltiplas cadeias diferentes, simultaneamente para exploração global.

Os principais procedimentos da utilização do DREAM, apresentados no fluxograma da Figura 32, são:

1-Gerar aleatoriamente um conjunto de parâmetros candidatos baseados numa distribuição prévia;

2-Conduzir o modelo de fluxo no espaço dos parâmetros candidatos com o objetivo de obter as predições do modelo;

3-Estimar o valor da função *Likelihood*, a probabilidade conjunta dos modelos residuais entre as predições do modelo e os dados observados;

4-Decidir se o conjunto de parâmetros candidatos substituem o conjunto de parâmetros do estado ou não, baseado no valor da função *Likelihood*;

5- Armazenar o conjunto de parâmetros do estado num conjunto de dados.

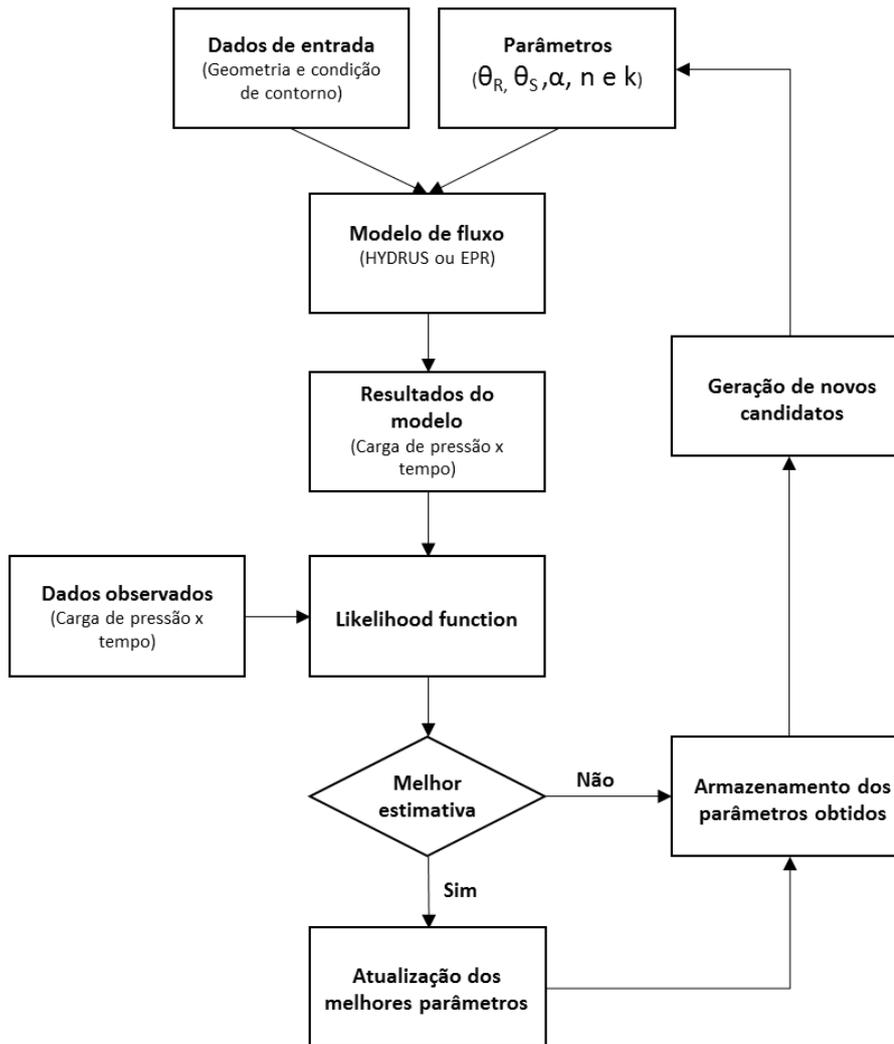


Figura 32 - Fluxograma resumido dos procedimentos de otimização com o DREAM. A função *Likelihood*, é utilizada para estimar a probabilidade conjunta de resíduos do modelo. A decisão da melhor estimativa é baseado no valor da função *Likelihood*. O Banco de Dados armazena apenas o parâmetro de estado definido em cada iteração. O conjunto de parâmetros candidatos é gerado a partir de evolução diferencial (modificado de Cheng, 2014).

Um maior número de iterações MCMC conduzirão a uma melhor convergência da distribuição parâmetro posterior (Andrieu et al, 2003). Como um exemplo para o cálculo da distribuição do parâmetro posterior (Figura 33) mostra o valor do parâmetro do modelo armazenado em um banco de dados de cada iteração MCMC estimando a probabilidade da distribuição do parâmetro do modelo pelo seu histograma. Com o objetivo de evitar os ruídos na Cadeia de Markov, a estimação da densidade Kernel é popularmente usada para suavizar os

parâmetros do modelo do histograma (linha vermelha na Figura 33. Quanto mais nítida a forma (ou mais estreito o intervalo) de distribuição de parâmetros posteriores, mais sensível então, é o parâmetro do modelo (Cheng, 2014).

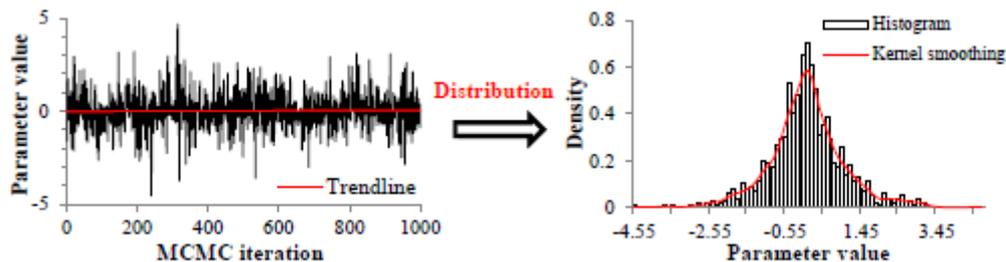


Figura 33 Esquema da Distribuição posterior do parâmetro. A suavização de Kernel é usada para reduzir os efeitos dos ruídos na cadeia de Markov (Cheng, 2014).

A função likelihood, em resumo, é a probabilidade conjunta dos resíduos do modelo entre as previsões do modelo e o dado observado. De forma similar a função objetiva, a função *likelihood* pode também medir os desvios entre os modelos preditos e os dados observados. O máximo da função *likelihood* é ocasionalmente usado para estimar os parâmetros estatísticos do modelo. O erro residual e_i é definido pela diferença entre os dados observados e aqueles simulados (CHENG, 2014).

Se o modelo residual e_i aleatoriamente distribui ao redor do dado observado de acordo com a probabilidade da função de densidade (PDF) ou $p(e)$, então, a densidade *likelihood* do modelo residual e_i é $p(e_i)$. Além disso, se o modelo residual (e_{i-1} e e_i) são, portanto, independentes e distribuídos de forma idêntica (I.I.D), logo, a probabilidade conjunta do modelo residual é produto das probabilidades do erro:

Equação 2.5

$$P = \prod_{i=1}^n p(e_i) \quad (2.5)$$

Onde:

O modelo residual/erros num conjunto de tempo i é e_i ;

N é a duração do modelo residual;

$P(x)$ é a probabilidade da função de densidade do modelo residual avaliado de x ;

O operador do produto é por sua vez Π

Normalmente, usa-se o valor do algoritmo da função da probabilidade conjunta (P):

Equação 2.6

$$l = \ln(P) = \ln\left(\prod_{i=1}^n p(e_i)\right) = \sum_{i=1}^n \ln(p(e_i)) \quad (2.6)$$

Onde :

P é a probabilidade conjunta do modelo residual;

$\ln(x)$ é a função algoritmo avaliada em x;

E o operador de soma é Σ .

A função *likelihood* com a hipótese do Erro gaussiano I.I.D é usada de forma corriqueira na análise Baysiana (Feyen et al., 2007; Yustres et al., 2012; Beven et al., 2012). Apesar disso, em alguns casos, o modelo residual não encaixa à hipótese do Erro Gaussiano (Schoups & Vrugt, 2010; Beven et al., 2012)

4.1.3. Modelo substituto - Regressão Polinomial Evolucionária (EPR)

A regressão polinomial Evolucionária (EPR) é uma técnica de dois estágios para a construção de modelos substitutos, sendo: (i) estrutura Identificação, e (ii) estimação de parâmetros. Este método, integra regressões numéricas e simbólicas para o desenvolvimento de regressão polinomial evolucionária, utilizando estruturas polinomiais.

O objetivo do EPR, é a utilização da busca evolucionária para expoentes de expressões polinomiais, por meio do mecanismo de algoritmo genético. Segundo Ahangar–Asr et al. (2011), esta técnica permite, primeiramente, uma fácil implementação computacional do algoritmo, a procura eficiente de uma equação explícita e por fim, um melhor controle da complexidade da expressão gerada (Giustolisi & Savic, 2006).

A EPR é um método de dados direcionados, baseados em computação evolucionária, que tem como objetivo, a busca por estruturas polinomiais que representem o sistema. Um sistema físico, tendo um output Y dependente de um conjunto de inputs X e parâmetros θ , pode ser então matematicamente formulado como:

$$y = F(X, \theta) \quad (2.7)$$

Onde F é a função num espaço m-dimensional e m é o número de inputs. Durante uma execução, ele retorna o número de expressões, com o aumento do

número de termos, até um limite de conjuntos dado pelo usuário, que permita um número ótimo de termos a serem selecionados.

$$y = \sum_{j=1}^m F(X, f(X, a_j)) + a_0 \quad (2.8)$$

Onde y é o vetor estimado do *output* do processo, a_j a constante, F é a função construída pelo processo, X é a matriz das variáveis do input, f é a função definida pelo usuário e m é o número de termos da expressão alvo. O primeiro passo na identificação da estrutura do modelo, é a transferência da equação 2 nas seguintes formas de vetores:

$$Y_{nx1}(\theta, Z) = [I_{Nx1} Z_{Nx1}^j][a_0 a_1 \dots a_m]^T = Z_{Nx1} \times \theta_{1xd}^T \quad (2.9)$$

Onde $Y_{nx1}(\theta, Z)$ é o vetor estimado dos mínimos quadrados do valor alvo buscado de N ; θ_{1xd} é o vetor de $d=m+1$ parâmetros a_j e a_0 (θ^t) é o vetor transposto e Z_{Nx1} é a matriz formada por 1 (vetor unitário) para a_0 e m vetor de variáveis Z^j . Para um j fixo, as variáveis Z^j . São produtos de um vetor independente predito de inputs, $X = \langle X_{1x2} \dots X_k \rangle$.

Inicialmente, utilizando um algoritmo genético padrão, busca-se a melhor forma da função de estrutura; a combinação de vetores de inputs independentes, $X_{S=1:k}$, ele desenvolve ainda, a regressão de quadrados mínimos na busca de parâmetros ajustáveis, θ , para cada combinação de inputs. Dessa forma, a busca de um algoritmo global, é implementada por ambos, o melhor conjunto de combinações de inputs e exponenciais relacionados simultaneamente, de acordo com a definição da função-custo do usuário (Giustolisi & Savic, 2006). Os parâmetros ajustáveis, a_j são então, avaliados por meio do método dos quadrados mínimos lineares baseados na minimização da soma dos erros quadráticos (SSE), como função-custo. A função SSE, que é usada para guiar o processo de busca acerca do melhor modelo de encaixe, é:

$$SSE = \frac{\sum_{i=1}^n (y_a - y_p)^2}{N} \quad (2.10)$$

Onde y_a é o valor alvo no treinamento do conjunto de dados e y_p é a predição do modelo. A busca global pela melhor forma de equação EPR é desenvolvida, por meio de um algoritmo genético padrão, sobre os valores no vetor de expoentes definido pelo usuário. O processo EPR acaba, quando os critérios de terminação, que pode ser o máximo de número de gerações numa expressão matemática alvo, ou um determinado erro particular admissível, é então satisfeito.

4.2. Metodologia para estimativa de parâmetros

Neste capítulo são abordados os métodos numéricos utilizados para a determinação dos parâmetros hidráulicos, através dos dados obtidos nos ensaios de infiltração monitorada. No presente estudo, a estimativa de parâmetros foi realizada através da retroanálise (i.e. através da resolução de problemas inversos).

Os parâmetros foram determinados de três formas para a posterior análise comparativa entre os mesmos. O fluxograma apresentado na Figura 34 ilustra cada método, sendo eles:

- Utilizando o software Hydrus com a solução inversa
- Utilizando o DREAM acoplado com o software Hydrus
- Criação de um modelo substituto através da EPR, a partir de diversas simulações numéricas do Hydrus e a posterior otimização com o DREAM.

A utilização de um modelo substituto através da EPR, fez-se necessário tendo em vista o tempo elevado de cálculo utilização o DREAM com o modelo numérico HYDRUS. Deste modo, ao substituir o modelo numérico por uma equação analítica, foi reduzido assim, o esforço computacional, minimizando o tempo de convergência. No entanto, é importante destacar que a equação analítica obtida pela EPR é uma equação empírica com base no modelo numérico (Hydrus). Desta forma, é importante analisar posteriormente a representatividade física da equação analítica obtida através do modelo numérico.

Nos estudos realizados por Morales (2008), e Pinto (2013), os parâmetros α , n e k do modelo de van Genuchten (1980) foram determinados pela retroanálise, enquanto que os outros parâmetros (θ_r e θ_s) foram considerados conhecidos de modo a se facilitar a identificação dos demais parâmetros retroanalizados. No presente estudo, a distribuição inicial dos parâmetros hidráulicos, foi obtida através do programa Rosetta (Schaap et al, 2001) a partir de dados texturais obtidos pelo ensaio de granulometria. Esta metodologia foi utilizada por Gomes et al. (2016) e justifica-se pelo fato do DREAM ser um método de busca global, e desta forma espera-se poder retroanalisar todos os cinco parâmetros (θ_r , θ_s , α , n e k).

Além disso, como entrada de cada método, foram consideradas a geometria do ensaio, as condições de contorno e os dados observados.

Neste item estão detalhadas as metodologias utilizadas em cada um dos três métodos.

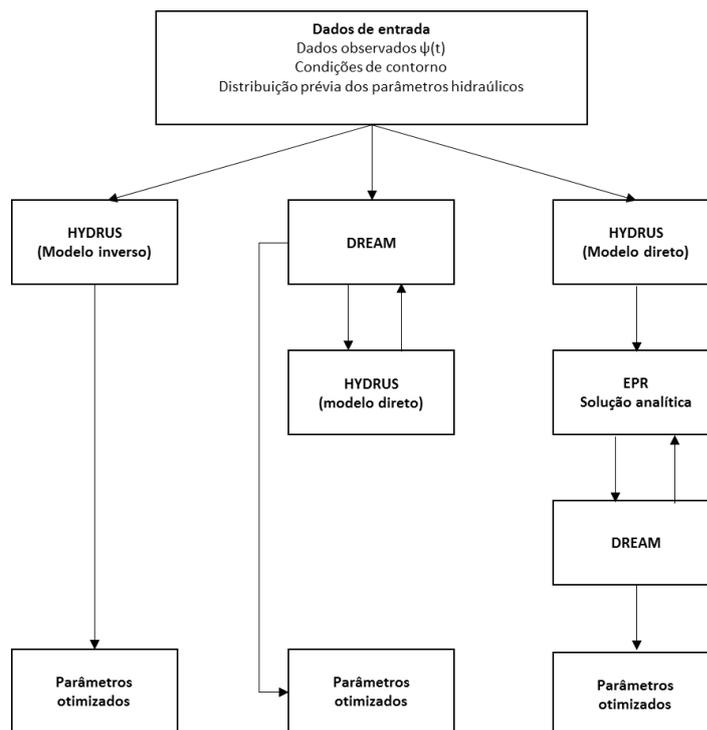


Figura 34 – Fluxograma simplificado de organização dos métodos utilizados

4.2.1. Método inverso através do método de otimização de Levenberg-Marquardt – software Hydrus

Para a modelagem com o software Hydrus, foram estabelecidas condições de axissimetria (Figura 35) em um furo de profundidade conhecida, limitado a uma dada carga de pressão positiva constante, que é imposta como parte do contorno do problema. Foram estabelecidas as seguintes condições no modelo numérico:

- Condição inicial: foi considerada a sucção inicial, após a estabilização do tensiômetro.
- Malha de elementos finitos: Foi utilizada uma malha de elementos finitos de dimensão 1 cm de lado, com aproximadamente 9000 elementos.
- Condições de contorno: Foi utilizada a condição de contorno de carga constante de 13 cm, simulando a carga imposta pelo permeâmetro.

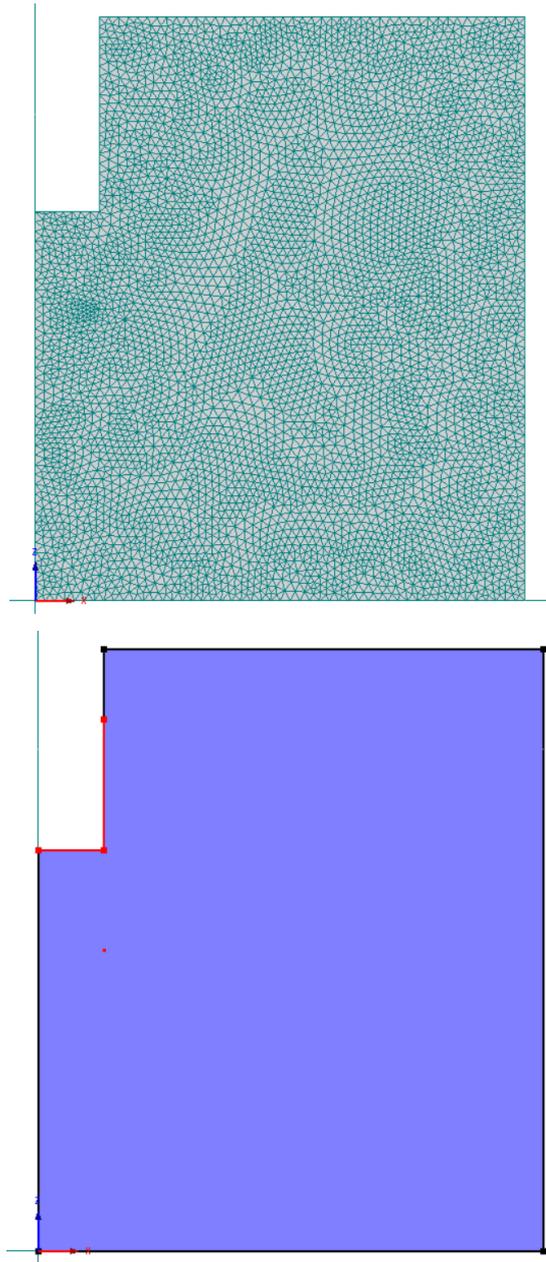


Figura 35 – Malha de elementos finitos com 1 cm e condição de contorno impostas no modelo, em vermelho carga hidráulica constante.

4.2.2.Utilização de modelo numérico para inferência bayesiana – Dream/Hydrus

O procedimento para a utilização dos resultados do Hydrus com o DREAM consiste em utilizar uma função no software Matlab, onde Y é um vetor com os resultados do modelo numérico Hydrus e X são os parâmetros otimizados pelo DREAM, ou:

$$Y = \text{HYDRUS}(x) \quad (4.5)$$

Desta forma, Y são os resultados de carga de pressão modelados a cada iteração e x são os parâmetros hidráulicos de entrada no modelo numérico (HYDRUS).

Foi utilizada a função likelihood número 11, que representa a função Gaussiana, conforme Thiemann et al. (2001). A função Likelihood 11, segundo Vrugt (2016) e apropriada se o modelo do output consiste em vetores (ou escalar) de valores simulados de alguma propriedade temporalmente ou espacialmente variável.

Foram utilizados 8 cadeias, 1000 gerações, tendo em vista que valores acima dos supracitados inviabilizaram a estimativa dos parâmetros hidráulicos através deste método. Cada simulação direta no modelo do Hydrus tem a duração aproximada de 10 a 20 s segundos em média para este problema, portanto utilizando 8 cadeias por 1000 gerações, são 8000 simulações diretas com o Hydrus, ou seja aproximadamente 22 horas de simulação total.

4.2.3. Utilização de modelo substituto para inferência bayesiana – DREAM/EPR

A elaboração de um modelo substituto para simular as condições do ensaio foi realizada através das seguintes etapas:

- Etapa 01 – Geração de distribuição prévia para os parâmetros hidráulicos de cada solo

Foram gerados 100 parâmetros uniformemente distribuídos a partir do programa Rosetta (Schaap et al, 2001). A distribuição prévia dos parâmetros hidráulicos, está ilustrada nos gráficos da curva característica e função de permeabilidade apresentados na Figura 36. A região hachurada corresponde a distribuição prévia dos parâmetros hidráulicos derivada com o Rosetta (cerca de 1000 combinações de parâmetros).

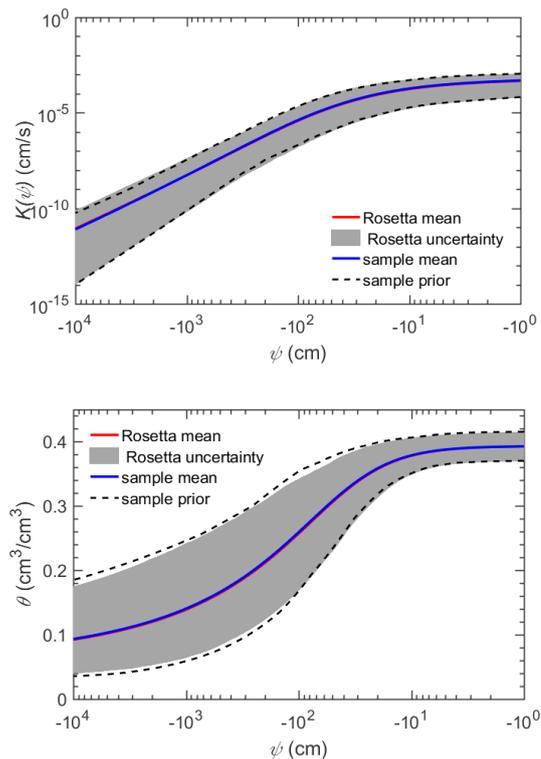


Figura 36 – Exemplo de distribuição prévia dos parâmetros hidráulicos utilizados.

- Etapa 02 – Simulação numérica do modelo de infiltração

Os 100 (cem) conjuntos de parâmetros hidráulicos, obtidos na etapa anterior, foram inseridos no software Hydrus, onde a infiltração foi simulada através do modelo direto. Foram utilizadas as mesmas condições de contorno, geometria, condição inicial e pontos de observação daquelas utilizadas no ensaio de campo e nos métodos anteriores.

Desta forma, foram obtidas 100 (cem) curvas de infiltração relacionando carga de pressão (cm) x tempo (s), conforme ilustrado na Figura 37.

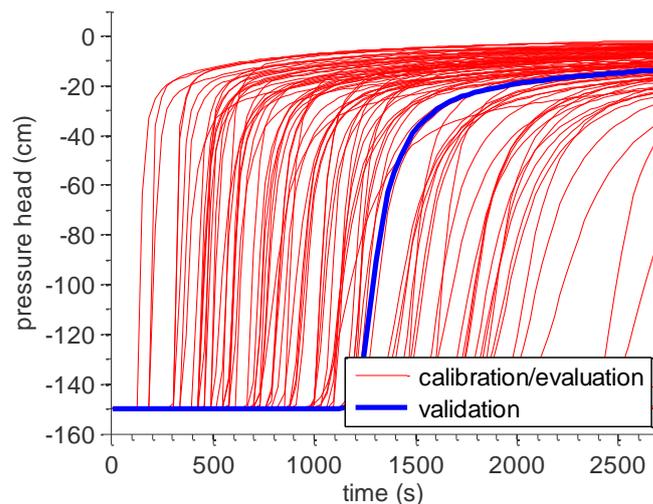


Figura 37 – Ilustração das curvas de infiltração geradas pelo modelo direto e utilizando os 100 (cem) conjuntos de parâmetros hidráulicos de entrada.

- Etapa 03 – Geração do modelo substituto através da EPR

O modelo substituto foi gerado, utilizando a Regressão Polinomial Evolucionária (EPR). Com isso, com base nas curvas de infiltração obtidas pelo modelo direto na etapa anterior, é possível derivar uma equação empírica para a carga hidráulica (h). O modelo é função de coeficientes empíricos (β), tempo (t), umidade no passo de tempo ($\theta(h)$), e parâmetros do modelo van Genuchten (x), onde $x = \{\theta_r, \theta_s, \alpha, n, k\}$.

Deste forma, a carga hidráulica (h) pode ser definida através de uma equação do tipo:

$$h = \beta_1 + \beta_2 \times \theta(h)^{1,5} \times t^{-1,5} \times \theta_r^{-1} \times \alpha^{1,5} + \beta_3 \times \theta_s^{-0,5} \times K_{sat}^{-1,5} + \beta_4 \dots + \beta_5 \dots$$

Feito isso, é necessário avaliar o coeficiente de determinação (CoD) e a soma dos erros residuais (SSE) que monitoram a evolução diferencial na busca pelo melhor parâmetro. Quanto maior o CoD e menor a SSE, melhor o seu modelo EPR se ajustará aos dados de calibração. A Figura 38 ilustra um exemplo de calibração da equação obtida através pela EPR, onde é comparada a carga hidráulica modelada pelo método direto (eixo Y) com a carga hidráulica calculada através da equação empírica (Eixo X).

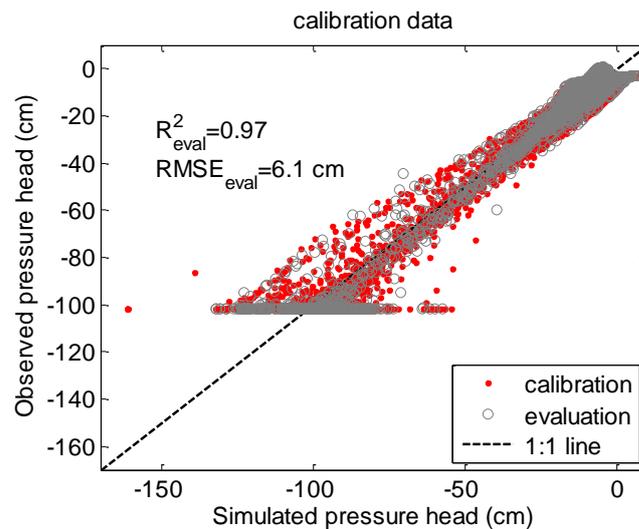


Figura 38 – Exemplo de calibração do modelo gerado pela EPR

- Etapa 04 – Utilização do modelo substituto como *input* do DREAM

O modelo substituto gerado pela EPR é utilizado no DREAM, que por sua vez, atualiza os parâmetros de entrada a cada interação da equação e os resultados são avaliados estatisticamente pelo DREAM.

- Etapa 05 – Avaliação da representação física do modelo substituto através da análise direta no HYDRUS

Com os parâmetros retroanalizados, foi realizada uma análise direta do modelo numérico, de forma a se verificar se a EPR está representando bem o modelo físico.

5 Resultados

5.1. Ensaio de laboratório - Caracterização física e papel filtro

Os resultados da caracterização física dos solos estudados foram utilizados como entrada no programa Rosseta (Schaap et al, 2001) para a determinação da distribuição prévia dos parâmetros hidráulicos. Neste item estão apresentados os índices físicos e a granulometria para cada EIM realizado.

Os índices físicos, resumidos na Tabela 1, foram obtidos através das amostras indeformadas coletadas para os ensaios de papel filtro. Observa-se que a porosidade dos solos estudados variou entre 32% e 50%. A amostra do colúvio, como era de se esperar, apresentou valores elevados atingindo 50% de porosidade média entre as amostras. A menor porosidade foi encontrada no solo residual maduro (GF-M-03) com valor de 31%. A umidade natural das amostras variou entre 9% (GF-M-03) e 21% (Colúvio). Quanto ao grau de saturação, observa-se que em geral apresentou valores elevados, com valor mínimo de 43 % GF-02-J.

A Tabela 2 apresenta o resumo da análise granulométrica para os solos estudados. Em geral, observa-se que os solos foram majoritariamente arenosos, com exceção da amostra BG-01 que apresentou elevada fração de silte (38%).

Tabela 1 – Índices físicos das amostras coletadas em Solo residual.

Local	Umidade natural média- w	Peso específico		Densidade real dos grãos G	Porosidade total – n	Índice de vazios - e	Grau de saturação – S %	Número de amostras indeformadas
		natural	seco					
	%	g/cm ³	g/cm ³		%	-	%	
*BG-01 e BG-02	19.60%	1.91	1.61	2.69	39.0%	0.64	77.24	10
GF-J-01	13.50%	1.84	1.62	2.65	38.8%	0.64	56.4	5
GF-J-02	11.50%	1.81	1.62	2.67	39.2%	0.65	43.2	5
GF-M-03	9.10%	2.05	1.87	2.71	31.7%	0.46	54.9	5
Colúvio	21.60%	1.51	1.24	2.64	50.2%	1.13	50.9	6

*A amostra BG-01 não foi coletada no mesmo dia do EIM

Tabela 2 – Resumo do ensaio de granulometria

	Pedregulho (%)	Areia Grossa (%)	Areia Média (%)	Areia Fina (%)	Silte (%)	Argila (%)
BG-01	1.1	20.6	13.5	15.1	38.0	11.8
GF-J-01	22.9	24.3	14.5	19.4	13.5	5.4
GF-J-02	18.5	23.4	11.0	15.9	19.4	11.7
GF-M-03	10.5	29.1	15.4	18.8	14.7	11.6
Colúvio	13.0	13.2	16.1	22.7	26.6	8.4

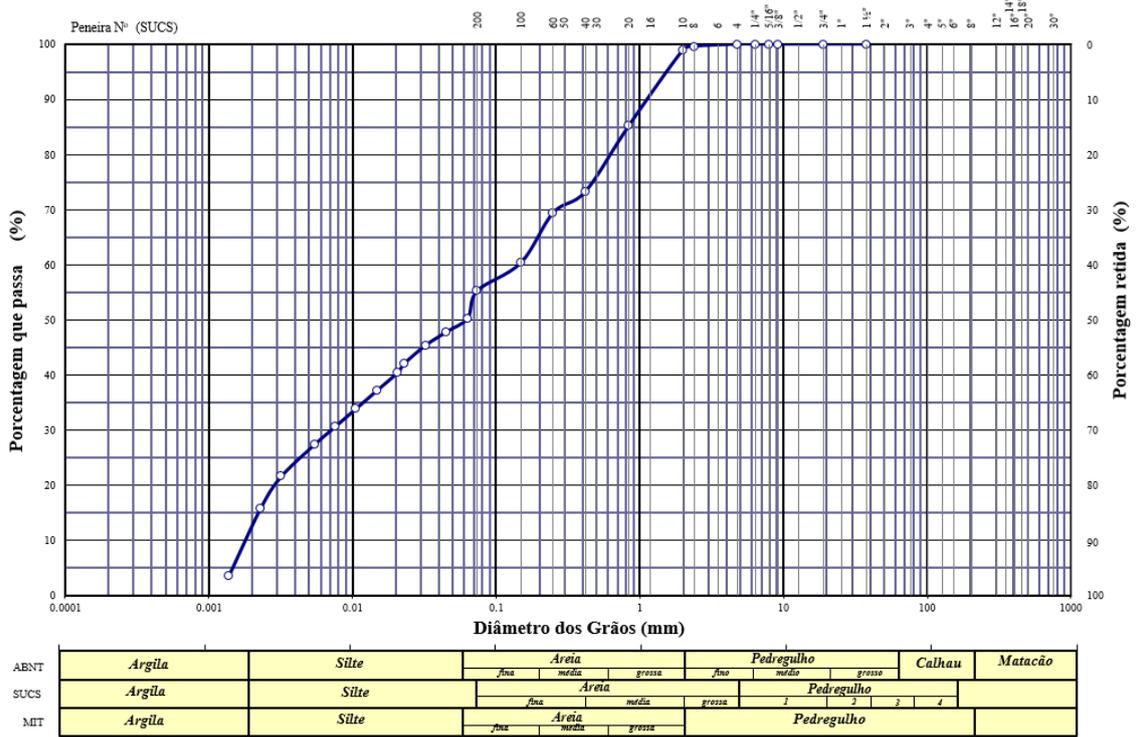


Figura 39 – Curva granulométrica – BG-01

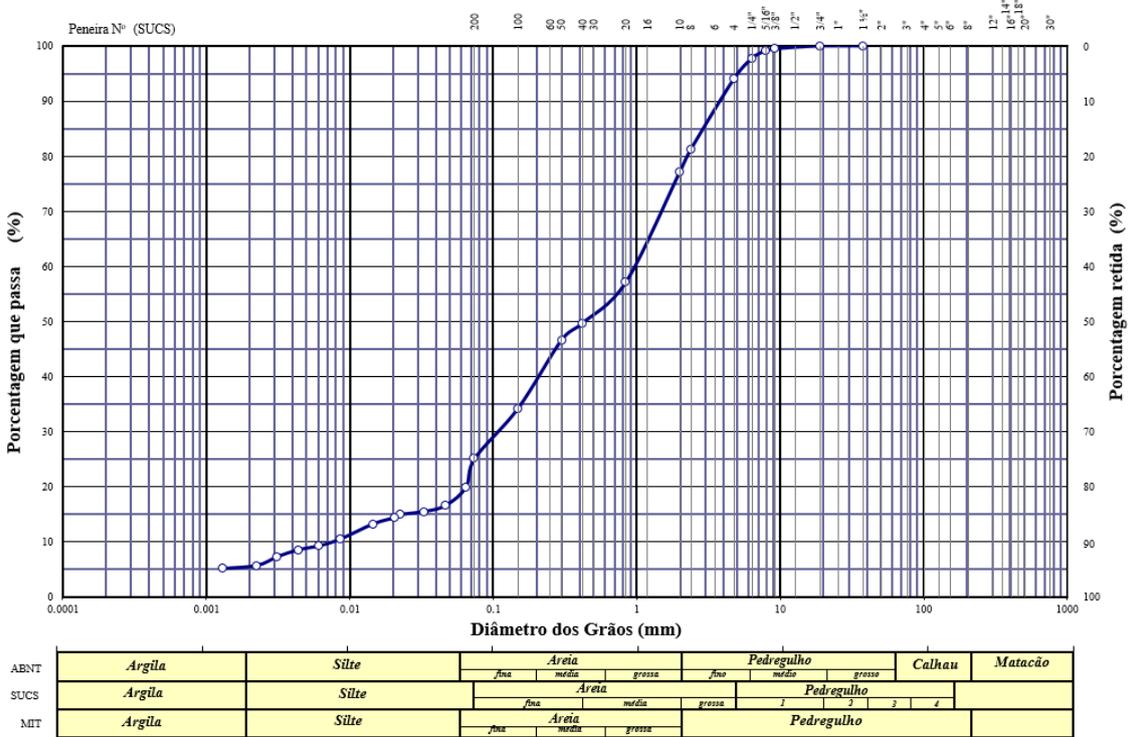


Figura 40 – Curva granulométrica – GF-J-01

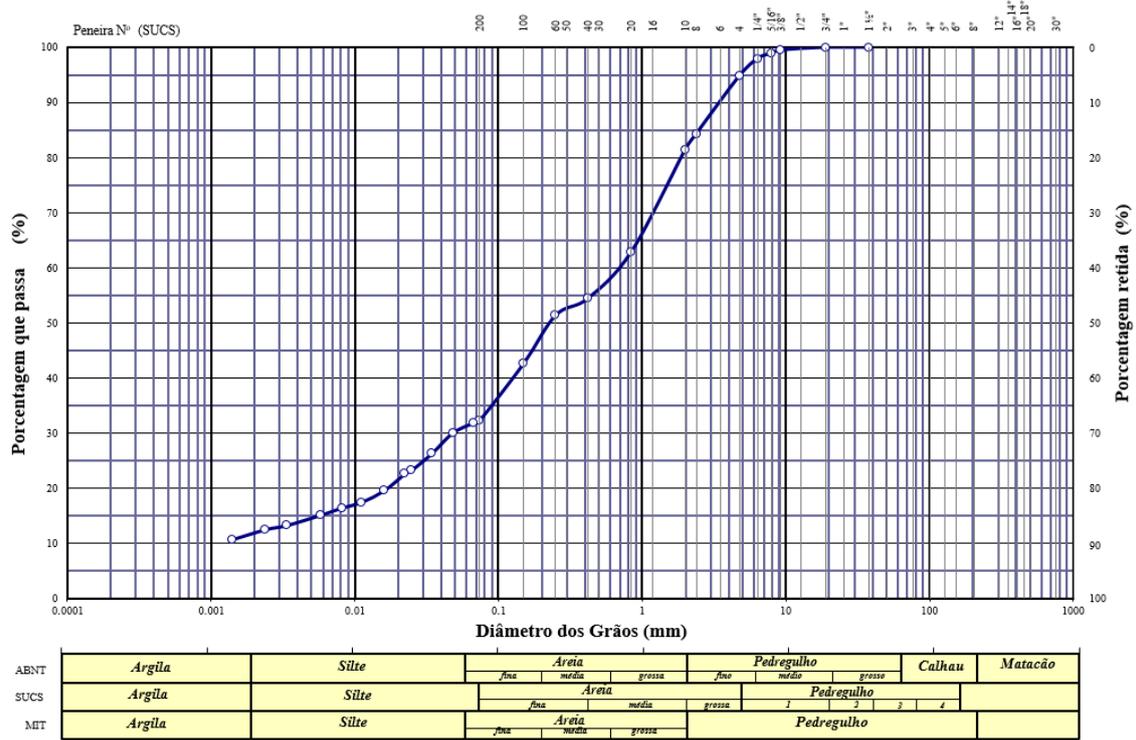


Figura 41 – Curva granulométrica – GF-J-02

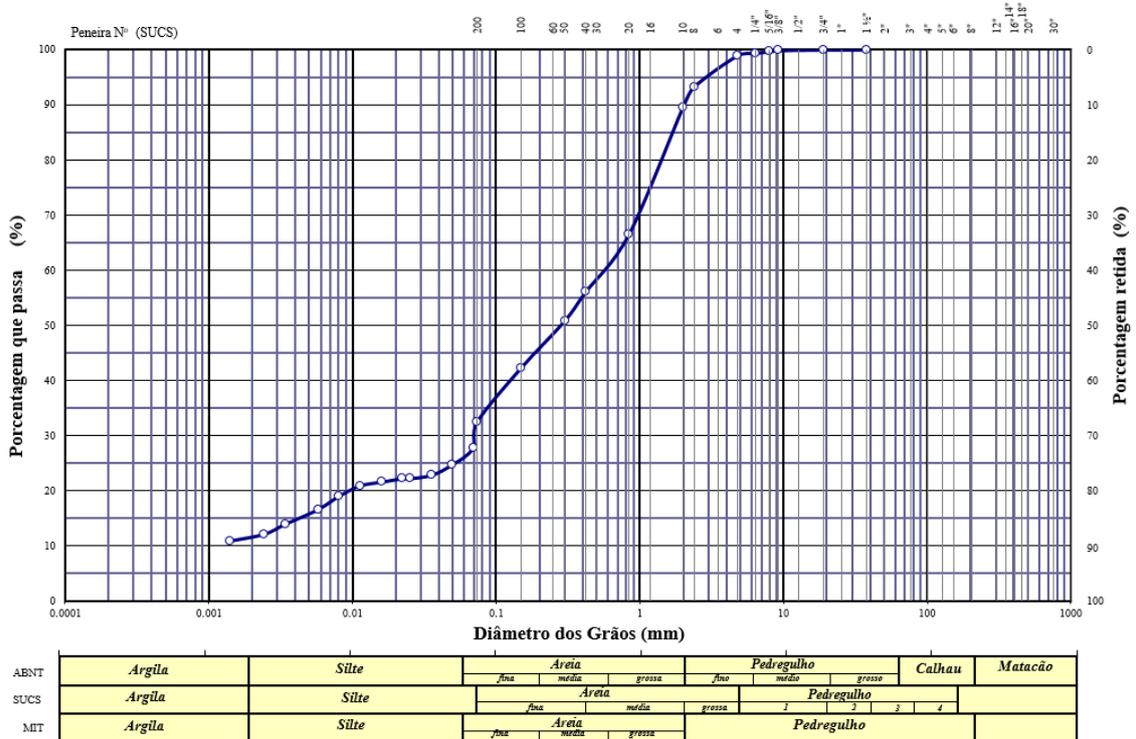


Figura 42 – Curva granulométrica GF-M-03

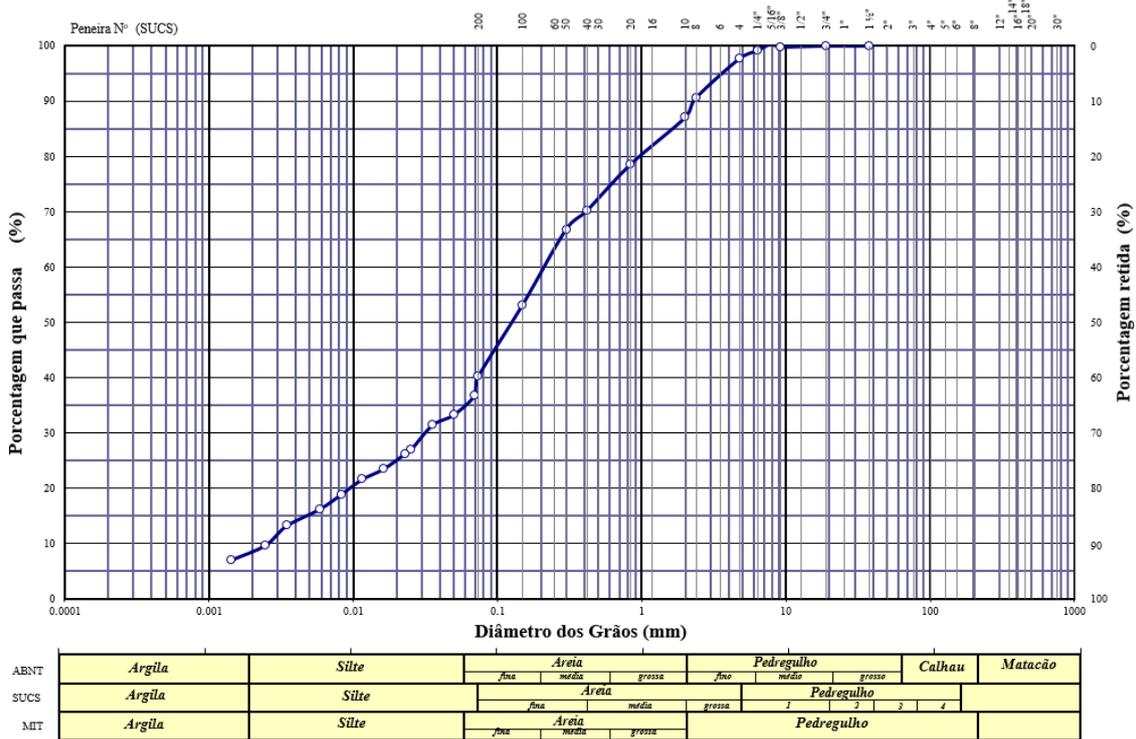


Figura 43 – Curva granulométrica Colúvio

A Figura 44 apresenta as curvas características obtidas através do ensaio de Papel filtro e a Tabela 3 apresenta os parâmetros hidráulicos ajustados para cada curva. Observa-se que as amostras podem ser divididas em dois grupos, sendo o primeiro dos solos arenosos (GF-01-J, GF-02-J e GF-03-M), e o segundo dos solos silto-arenosos (BG-01 e colúvio). Em geral observa-se que para uma dada umidade os solos arenosos apresentam sucção matricial inferior quando comparados com os solos silto-arenoso, como era de se esperar. Além disso, os solos arenosos, em geral, apresentaram baixo valor de entrada de ar quando comparados com o segundo grupo.

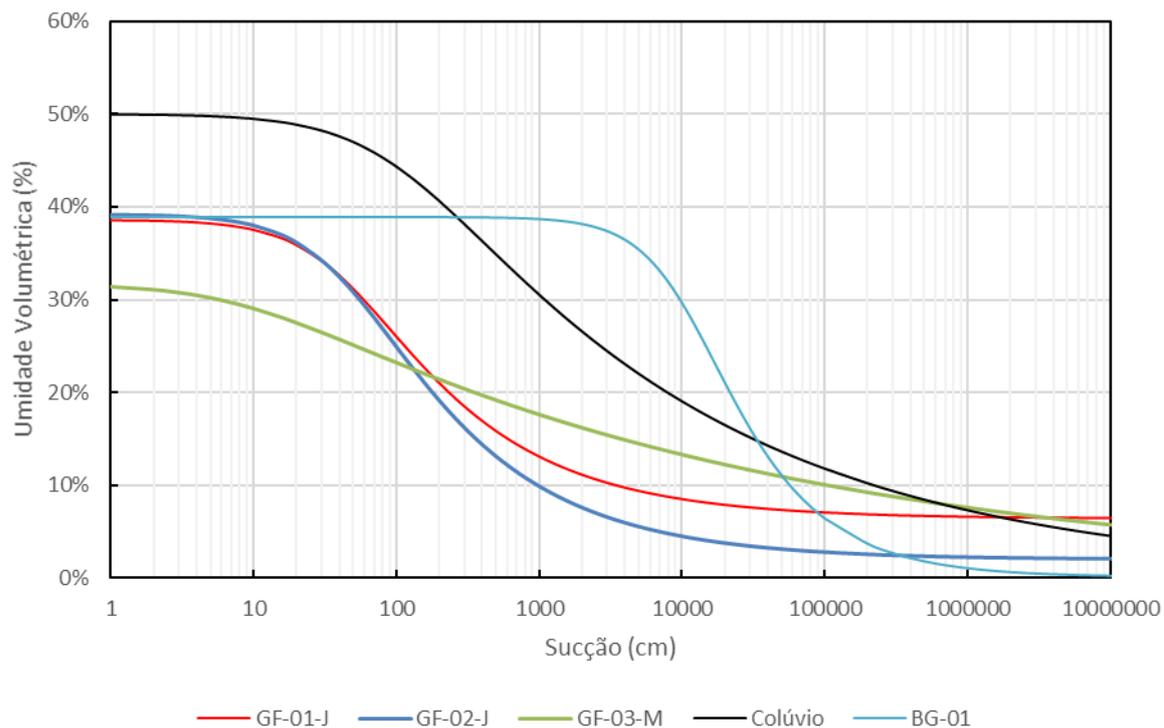


Figura 44 – Síntese das curvas características obtidas pelo ensaio de Papel Filtro

Tabela 3 – Parâmetro hidráulicos obtidos através do ensaio de papel filtro

	GF-M-01	GF-M-02	GF-J-03	Colúvio	BG-01
θ_{RES}	0.064	0.020	0.001	0.001	0.001
θ_{SAT}	0.386	0.392	0.317	0.500	0.389
α (1/cm)	0.023	0.022	0.3	0.010	0.0001
n	1.503	1.500	1.123	1.210	1.821
m	0.335	0.333	0.110	0.174	0.451

5.2. Resultados dos Ensaio de Infiltração Monitorada

Neste item estão apresentados os resultados dos EIM para cada área de estudo. Inicialmente são apresentados os resultados da variação da sucção e da umidade além a geometria de cada ensaio realizado. Estão apresentados também a distribuição inicial dos parâmetros hidráulicos não saturados. Estes parâmetros iniciais visam fornecer os limites máximos e mínimos de busca pelo parâmetro ótimo tendo sido elaboradas com base na granulometria e índice físicos do solo.

São apresentados também os resultados dos parâmetros hidráulicos não saturados obtidos por cada método através da retroanálise da curva de infiltração

(Hydrus, Dream e EPR), representados através de curvas características, e curvas de infiltração modelada. Finalmente, são apresentadas as curvas de calibração (observado x calculado) assim com os coeficientes de correlação para cada parâmetro.

5.2.1.BG-01 e BG-02

Foram realizados dois EIM no solo residual de Biotita Gnaiss localizado no município de Rio das Ostras. As duas tentativas foram fracassadas, no entanto, mesmo estes ensaios não terem apresentados resultados satisfatórios é importante apresentar os resultados do ensaio de campo, tendo em vista que podem auxiliar estudos futuros para a interpretação do EIM.

O fator chave para a não consideração destes resultados foi a sucção inicial do ensaio. A primeira tentativa de ensaio neste solo apresentou uma sucção inicial do tensiômetro de aproximadamente 80 kPa (800 cm), conforme pode ser constatado na Figura 45. Tendo em vista que esta sucção se encontra muito próxima ao valor de entrada de ar da pedra porosa do tensiômetro, foi realizado uma constatação em laboratório através de um papel filtro da sucção inicial do ensaio. Feito isso, foi constatado que a sucção inicial do ensaio era de aproximadamente 200 kPa (2000 cm), i.e. muito superior ao valor de entrada de ar do tensiômetro. Deste modo, na curva de infiltração apresentada na Figura 45, o trecho inicial onde aparentemente é considerada uma estabilização da sucção do tensiômetro na verdade indica a cavitação do equipamento. Além disso, a inflexão observada aos 90 minutos do ensaio BG-01 indica comportamento bimodal impedindo a retroanálise dos resultados.

Esta inflexão também foi notada no segundo ensaio (GF-02), tendo em vista que o equilíbrio da sucção do solo ocorreu com sucção de -2 mca e não valores próximos de zero como era de se esperar. O segundo ensaio teve duração de aproximadamente 8 horas não apresentando resultados satisfatório.

Estes resultados auxiliaram na escolha dos ensaios seguintes, de modo a escolher solos mais arenosos e com menos sucção inicial. Desta forma, as tentativas de ensaios seguintes que ocasionaram em sucção inicial entre 700 cm e 800 cm não foram continuados e não serão apresentados no presente estudo.

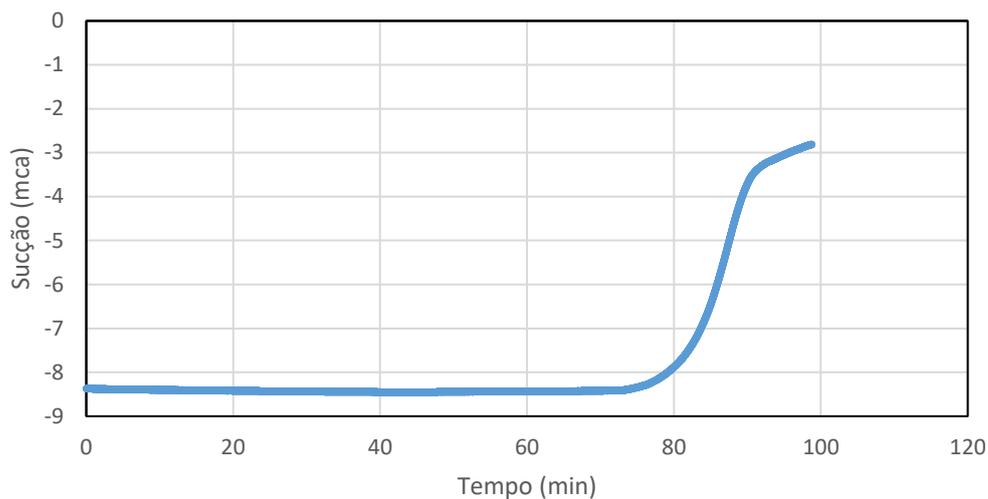


Figura 45 – Variação da sucção no ensaio BG-01.

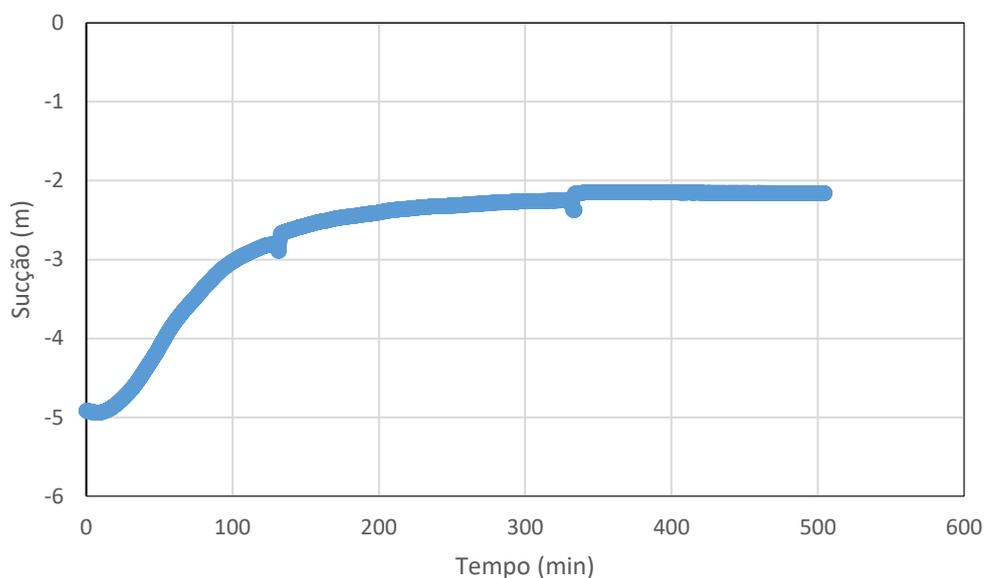


Figura 46 – Curva de infiltração BG-02.

5.2.2.GF-01-J

- Curva de infiltração e geometria

A Figura 47 apresenta a variação da sucção, da umidade e a geometria do ensaio GF-01-J. Neste ensaio foi utilizado um tensiômetro, posicionado na posição vertical e no eixo de simetria do furo, e um sensor de umidade de solo, posicionado 10 cm abaixo da cápsula porosa do tensiômetro, conforme apresentado na Figura 47.

A sucção inicial do ensaio foi de aproximadamente -108 cm atingindo a estabilização em aproximadamente 2000 s. O monitoramento da umidade volumétrica do solo não apresentou resultados satisfatórios, tendo em vista que a estabilização da umidade volumétrica ocorreu em, aproximadamente, 23% sendo que era de se esperar que este valor se aproximasse da umidade volumétrica saturada do solo, ou da porosidade. Ressalta-se que durante a realização a cravação do sensor de umidade foi difícil devido a resistência do solo. Acredita-se que a instalação do sensor não tenha sido adequada e, portanto, não será considerado a variação da umidade para este ensaio.

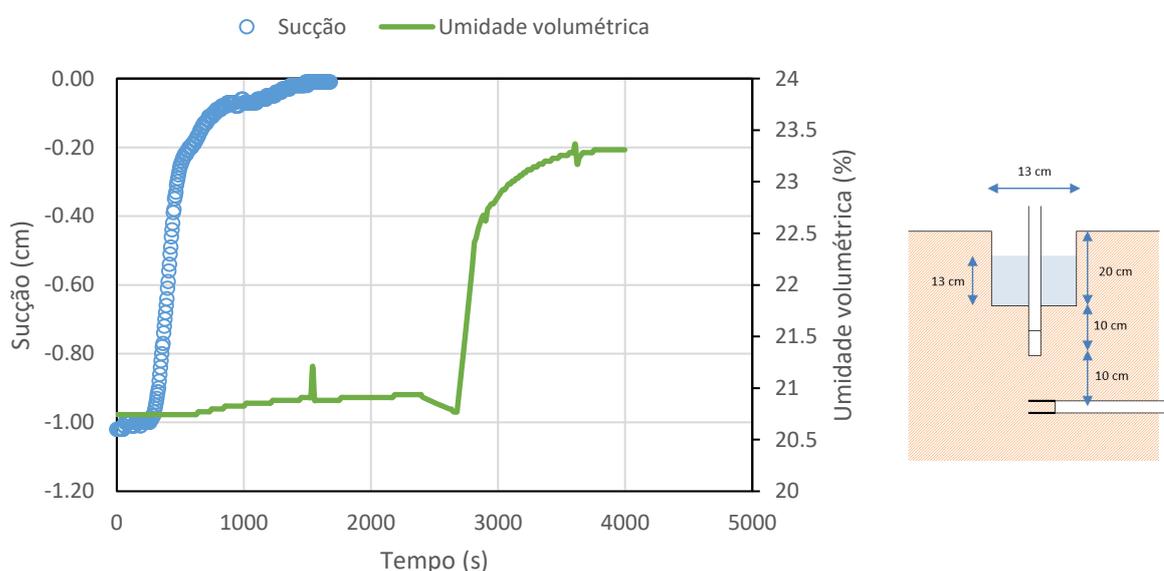


Figura 47 – Variação da sucção e umidade volumétrica e geometria do ensaio – GF-01-J

- Distribuição inicial dos parâmetros

A distribuição inicial dos parâmetros hidráulicos visa fornecer os limites máximos e mínimos de busca pelo parâmetro ótimo. Esta distribuição foi realizada com base na granulometria e índice físicos do solo. A Figura 48 apresenta a distribuição prévia considerada para o ensaio GF-01-J. Observa-se que o parâmetro θ_s variou entre 0,36 e 0,40, estando coerente com a porosidade obtida em laboratório. A umidade volumétrica residual θ_r variou entre 0,02 e 0,1.

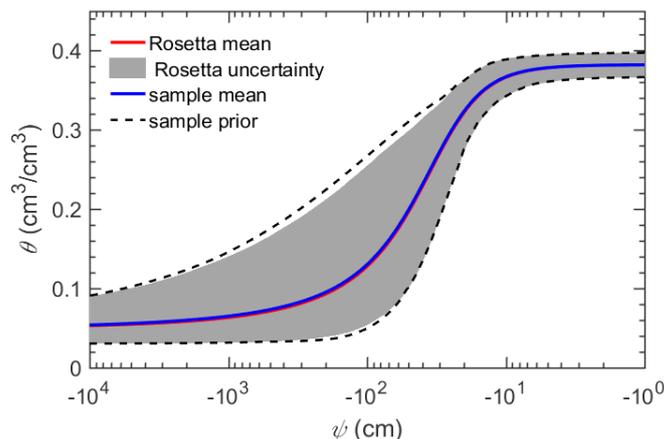


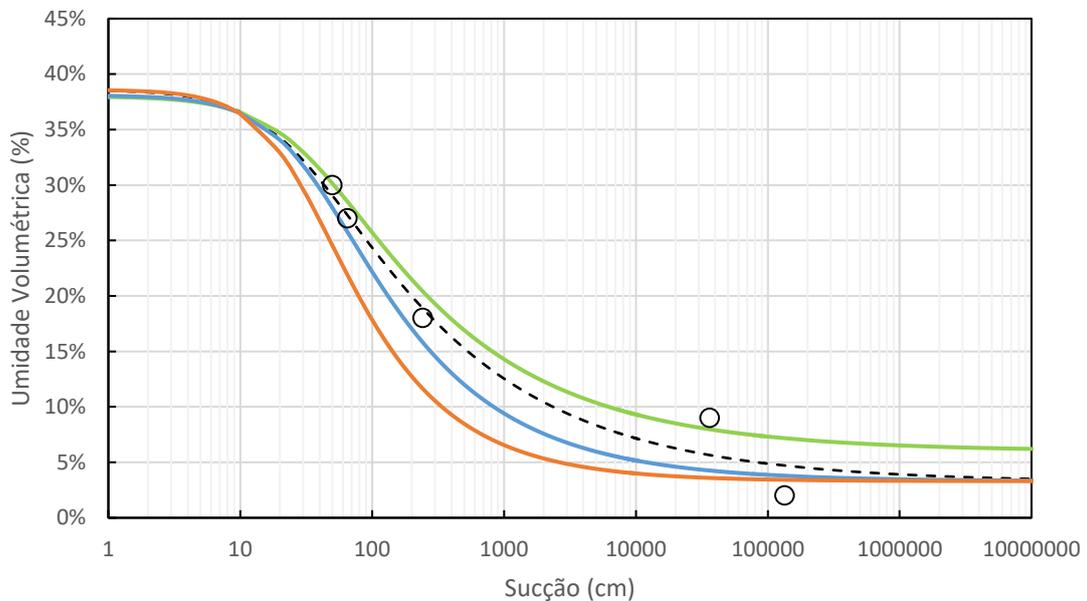
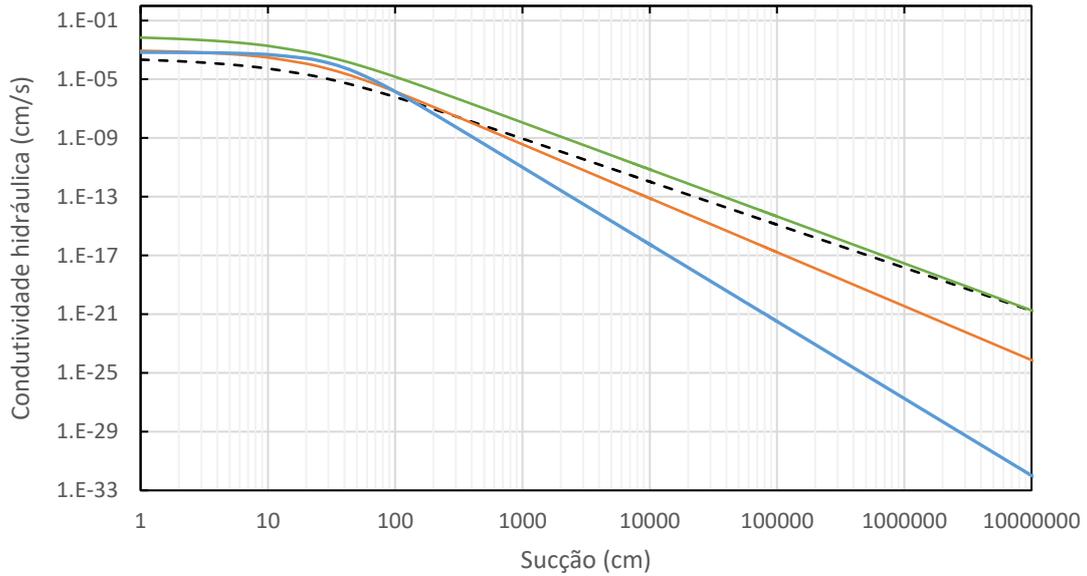
Figura 48 – Distribuição prévia dos parâmetros hidráulicos não saturados – GF-01-J.

- Parâmetros hidráulicos não saturados - Curva característica

Os resultados obtidos por cada método (Hydrus, Dream e EPR) através da retroanálise da curva de infiltração e o resultado do ensaio de papel filtro estão representados pelas curvas características apresentadas na Figura 49. Os resultados obtidos no *software* Hydrus e, por sua vez, otimizados pelos métodos de Levenberg-Marquardt estão indicação pela cor verde. Os resultados obtidos através do DREAM conjugado com o HYDRUS estão representados pela cor azul. A curva característica obtida através do modelo substituto (EPR) está representada pela cor verde. Comparativamente os resultados do ensaio de papel filtro foram plotados junto com os demais resultados e estão ilustrados pela linha tracejada preta.

Pode-se constatar na Figura 49 que, em geral, todas as três curvas modeladas apresentaram bons ajustes quando comparadas com o resultado do ensaio de papel filtro. Quanto ao valor de θ_s observa-se que todos os métodos encontraram aproximadamente o mesmo valor de aproximadamente 0,39, o que é coerente com a porosidade analisada. Em termos de θ_r , observa-se que o método de retroanálise do modelo substituto, obtido pela EPR, apresentou maior diferença dos outros métodos. O valor de entrada de ar, em geral, apresentou valores próximos, sendo que a curva retroanalisada pelo Hydrus apresentou maior distância da média.

Os parâmetros obtidos para cada método estão apresentados na Tabela 4. Observa-se que o parâmetro que apresentou maior desvio padrão foi a permeabilidade saturada (k_{sat}). O valor para este parâmetro obtido através da otimização da equação analítica obtida pela EPR apresentou valores cerca de dez vezes superiores através de outros métodos.



--- Papel Filtro — EPR — DREAM - 2D — Hydrus - Inverso ○ Pontos_PF

Figura 49 – Consolidação das curvas características obtidas pelos diferentes métodos de análise, estando representado em laranja a curva obtida pela análise inversa do Hydrus, em azul a curva obtida pelo DREAM conjugado com o Hydrus 2D, em verde a curva obtida pelo DREAM utilizando o modelo substituto (EPR) e a linha tracejada ilustra a curva característica obtida em laboratório pelo método do papel filtro.

Tabela 4 – Parâmetro hidráulicos calculados pelos diferentes métodos utilizados - GF-01-J.

	Papel Filtro	Hydrus	EPR	DREAM - 2D
θ_{RES}	0.032	0.033	0.06	0.033
θ_{SAT}	0.386	0.39	0.38	0.381
α (1/cm)	0.03529	0.04	0.029	0.029
n	1.37	1.67	1.40	1.516
m	0.27	0.401	0.286	0.340
k_{Sat}	-	1.10E-03	1.05E-02	8.00E-04

Tendo em vista que a retroanálise realizada utilizando a equação analítica obtida pela EPR é um modelo empírico, baseado em cem (100) curvas de infiltrações modeladas pelo Hydrus, deve verificar a representatividade física deste modelo. Desta forma, foram plotadas as curvas de infiltração modeladas com os parâmetros calculados através de cada método, conforme ilustrado na Figura 50.

As curvas de infiltração modeladas com os parâmetros obtidos pelo DREAM e pela solução inversa do HYDRUS apresentaram ótimo ajuste aos dados observados. Em contrapartida, utilizando no modelo direto os parâmetros obtidos via EPR não houve ajuste entre os dados observado com os modelados. Pode-se citar como fator preponderante para o não ajuste destes dados o valor da permeabilidade saturada calculada por este método, tendo em vista que foi superior aos demais métodos.

A Figura 50 apresenta o gráfico de calibração entre os métodos, estando representado no eixo X os dados de sucção modelados e no eixo Y os dados de sucção observados. Mais uma vez, é observado o ótimo ajuste entre os métodos Hydrus e DREAM que apresentaram coeficiente R^2 de 0,99. Por outro lado, constata-se que o método EPR apresentou um péssimo ajuste aos dados observados.

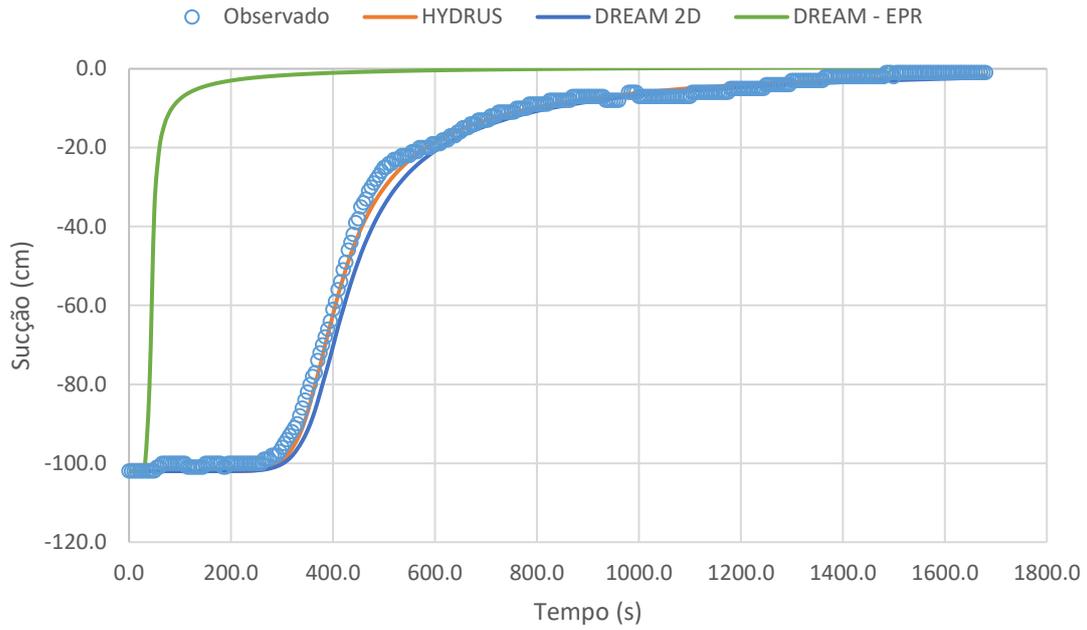


Figura 50 – Ajuste da curva de infiltração para os diferentes métodos testados - GF-01-J.

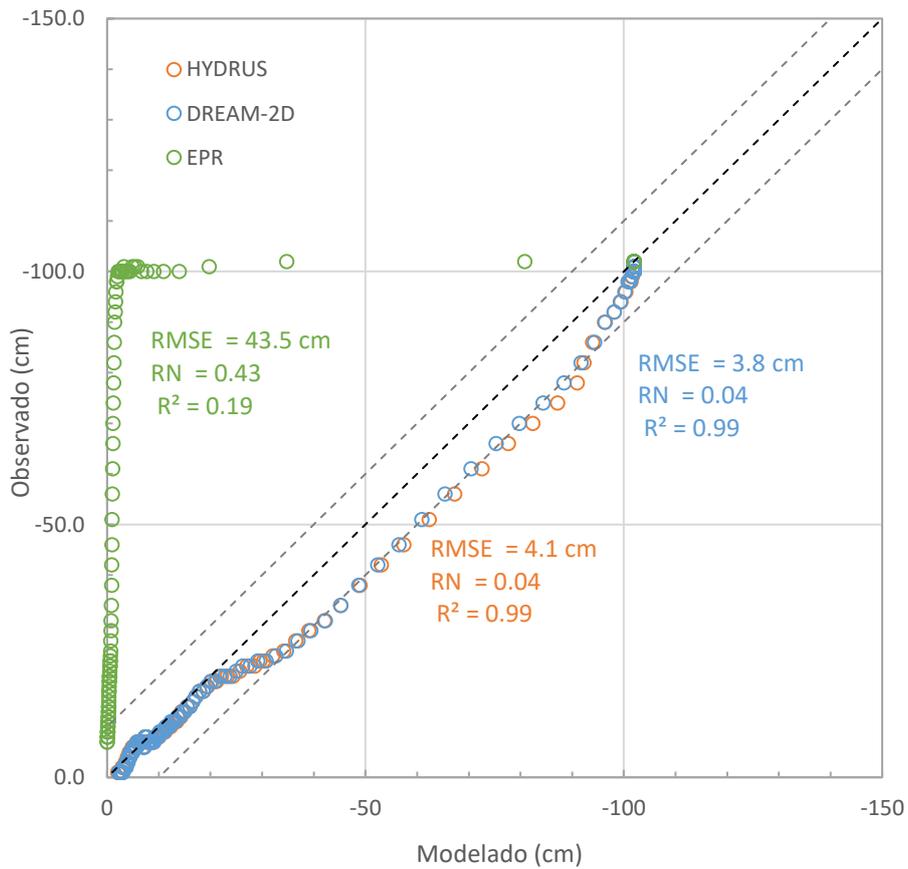


Figura 51 – Curva de calibração para os diferentes métodos testados – GF-01-J.

A matriz de correlação entre os parâmetros, apresentada na Tabela 7, indica que todos o método do DREAM/EPR apresentou os menores valores entre três métodos indicando bons resultados e baixa correlação (<0,9) para todos os parâmetros. Por outro lado, a correlação entre os parâmetros α e n foi elevada (>0.9) utilizando o Hydrus e o DREAM/HYDRUS. Em geral o DREAM apresentou menores coeficientes de correlação, especificamente o método utilizando a EPR, tendo em vista que foram utilizados mais cadeias e gerações.

Tabela 5 – Matriz de correlação entre os parâmetros retroanalizados – GF-01-J.

HYDRUS					DREAM - HYDRUS					DREAM - EPR				
	θ_r	θ_S	α	n		θ_r	θ_S	α	n		θ_r	θ_S	α	n
θ_S	-0.2				θ_S	0.06				θ_S	0			
α	0.16	-0.14			α	-0.04	-0.07			α	0.22	0.24		
n	0.15	-0.21	0.91		n	-0.01	-0.05	0.96		n	0	0.48	0.33	
k	-0.46	0.72	0.44	0.38	k	-0.78	0.31	0.51	0.49	k	0.02	0.066	-0.62	-0.16

5.2.3.GF-02-J

- Curva de infiltração e geometria

A Figura 52 apresenta a variação da sucção, da umidade e a geometria do ensaio GF-02-J. Neste ensaio foi utilizado um tensiômetro, posicionado na extremidade do furo sendo o sensor de umidade posicionado diametralmente oposto ao mesmo. Além disso, foi utilizado outro sensor de umidade de solo, posicionado 10 cm abaixo da cápsula porosa do tensiômetro, conforme apresentado na Figura 57.

A sucção inicial do ensaio foi de aproximadamente -208 cm atingindo a estabilização em aproximadamente 4000 s. O monitoramento da umidade volumétrica do solo apresentou resultados satisfatórios, coincidindo com os dados de sucção monitorados através do tensiômetro.

Quanto ao sensor de umidade posicionado diametralmente oposto ao tensiômetro, diferente do que se esperava, apresentou estabilização da umidade volumétrica inferior à umidade volumétrica saturada. É importante destacar que a trajetória de umedecimento não atinge a saturação completa, tendo em vista que, conforme Fredlund & Xing, (1994), ainda é mantido um volume residual de ar que podem contribuir para que o sensor não tenha atingido o teor de umidade volumétrica. Além disso, observa-se que houve uma defasagem quando comparada com a frente de saturação monitorada

pelo tensiômetro. Este ponto também foi observado em experimentos de infiltração realizados por Simunek, (1999) e Wang et al., (1998), ao constatarem que as leituras dos tensiômetros se estabilizavam antes do conteúdo de umidade (TDRs). Isto é, poros menores continuavam a receber umidade muito tempo após a passagem da frente de infiltração, subestimando a relação umidade x tensão (observações fora do equilíbrio, bolhas de ar oclusas).

Quanto ao sensor de umidade posicionado na posição horizontal 10 cm abaixo da cápsula porosa, é importante notar que a frente de infiltração demorou cerca do dobro do tempo para atingir este sensor, como era de se esperar, apresentando valores consistentes de umidade inicial.

Nota-se também que houve uma diferença de aproximadamente 2,5 % entre a umidade inicial monitorada pelos sensores.

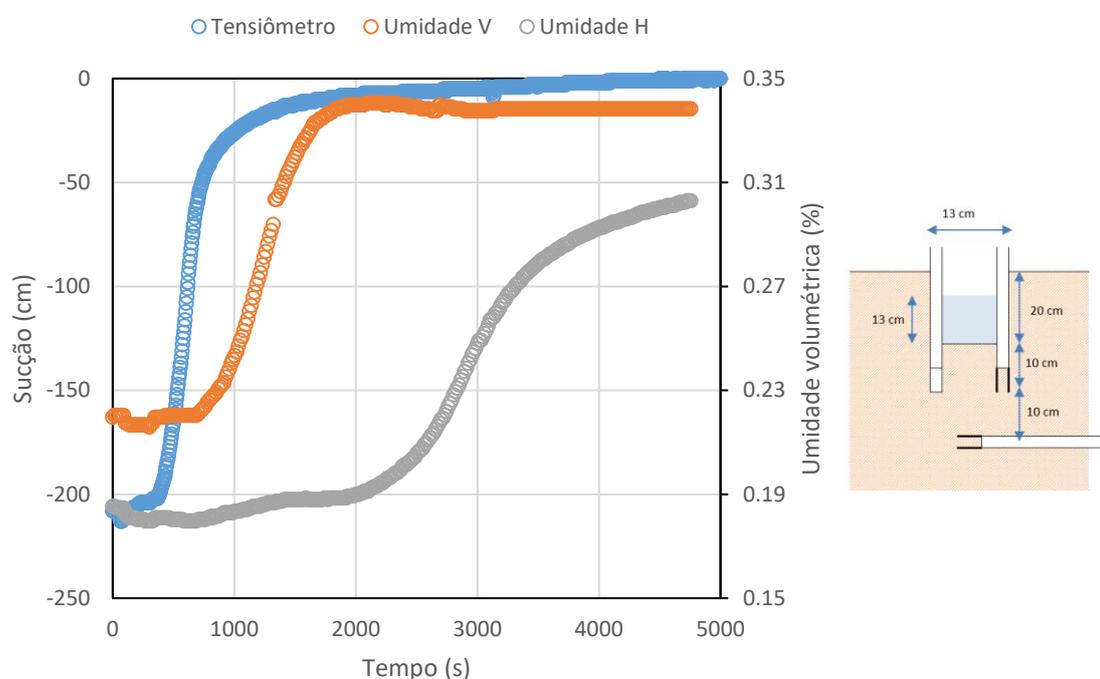


Figura 52 – Variação da sucção e umidade volumétrica e geometria do ensaio – GF-02-J

- Distribuição inicial dos parâmetros

A distribuição inicial dos parâmetros hidráulicos considerada para o ensaio GF-02-J está apresentada na Figura 63. O teor de umidade volumétrica saturada (θ_s) variou entre 0,36 e 0,40, estando coerente com a porosidade obtida em laboratório e a umidade volumétrica residual (θ_r) variou entre 0,02 e 0,08.

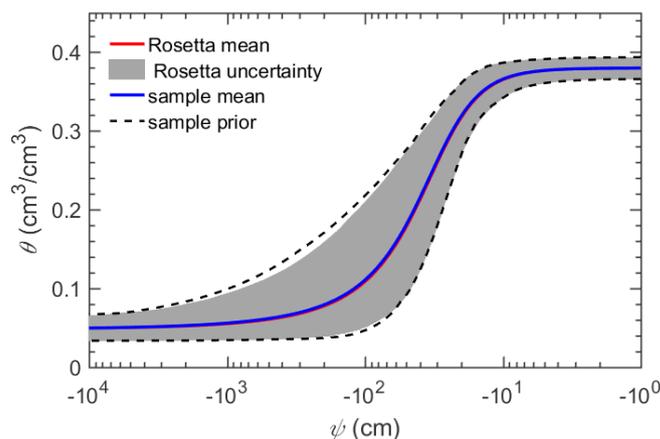


Figura 53 – Distribuição prévia dos parâmetros hidráulicos não saturados – GF-02-J.

Os resultados obtidos por cada método (Hydrus, Dream e EPR) através da retroanálise da curva de infiltração e o resultado do ensaio de papel filtro estão representados pelas curvas características apresentadas na Figura 54.

Pode-se constatar na Figura 54 que, em geral, todas as três curvas modeladas apresentaram bons ajustes quando comparadas com o resultado do ensaio de papel filtro. Quanto ao valor de θ_s observa-se que os parâmetros obtidos com o Hydrus apresentaram maior diferença com os demais métodos e com o valor da porosidade determinada. Os demais métodos encontraram aproximadamente o mesmo valor de aproximadamente 0,39, o que é coerente com a porosidade analisada. Em termos de θ_r , observa-se que, em geral os métodos apresentaram resultados próximos, no entanto a retroanálise pelo Hydrus apresentou maior diferença dos outros métodos. O valor de entrada de ar, em geral, apresentou valores próximos, sendo que a curva retroanalizada pelo Hydrus apresentou maior distância dos outros métodos. Os parâmetros obtidos para cada método estão apresentados na Tabela 6.

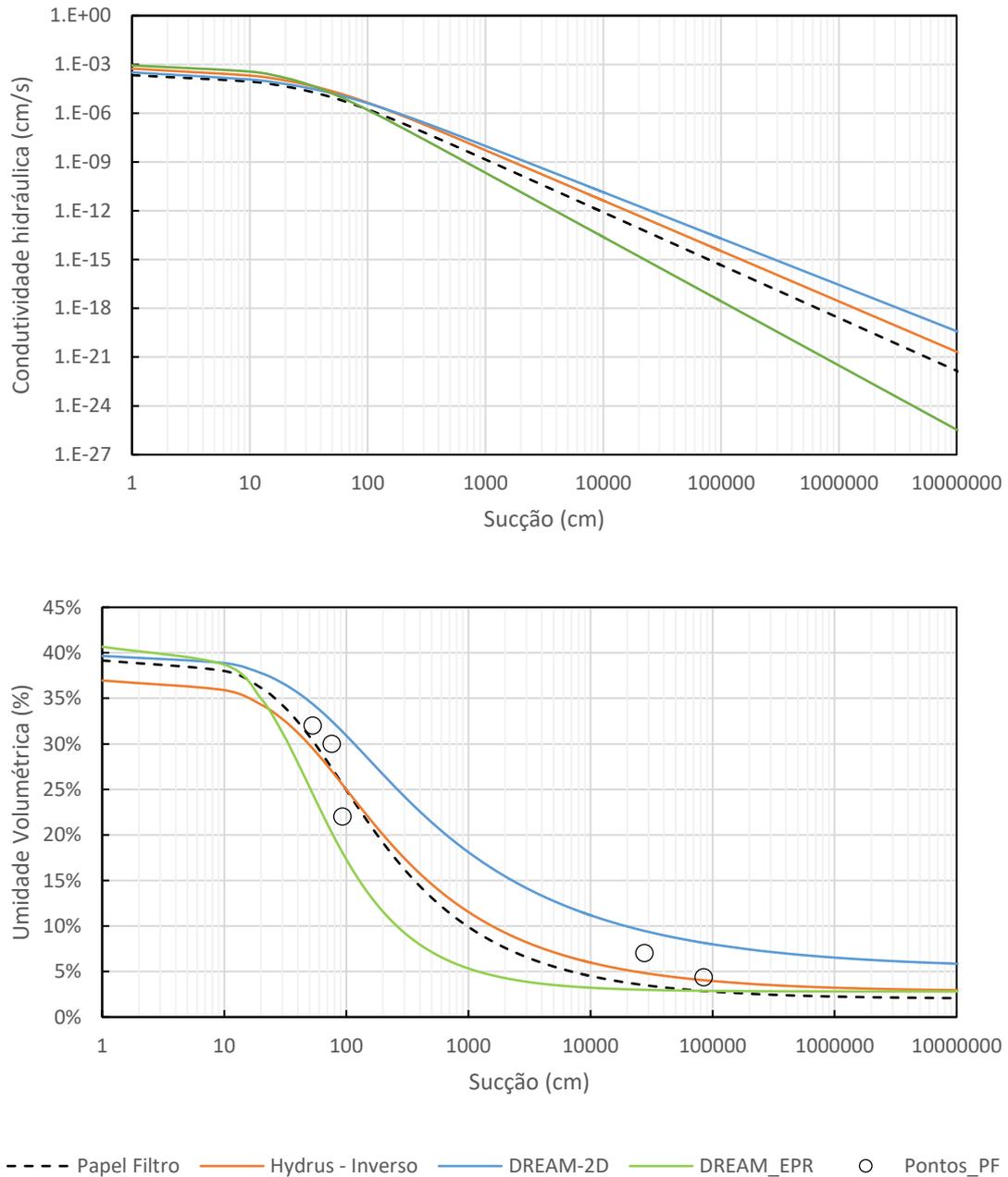


Figura 54 - Consolidação das curvas características obtidas pelos diferentes métodos de análise para o ensaio GF-02-J, estando representado em laranja a curva obtida pela análise inversa do Hydrus, em verde a curva obtida pelo DREAM conjugado com o Hydrus 2D, em verde a curva obtida pelo DREAM utilizando o modelo substituto (EPR) e a linha tracejada ilustra a curva característica obtida em laboratório pelo método do papel filtro.

Tabela 6 – Parâmetro hidráulicos calculados pelos diferentes métodos utilizados - GF-02-J.

	Papel Filtro	Hydrus	EPR	DREAM - 2D
θ_{RES}	0.02	0.028	0.028	0.053
θ_{SAT}	0.392	0.37	0.407	0.397
α (1/cm)	0.022	0.02	0.032	0.018
n	1.50	1.44	1.78	1.34
m	0.33	0.306	0.438	0.254
k_{Sat}	-	1.22E-03	1E-03	5.8E-4

As curvas de infiltração modeladas com os parâmetros calculados através de cada método, estão ilustradas na Figura 50. Nota-se que os três métodos apresentaram ajustes próximos aos dados observados, sendo que a curva retroanalizada pelo HYDRUS apresentou maior discrepância entre os demais métodos. Conforme pode ser observado na Figura 51, que apresenta o gráfico de calibração entre os métodos, estando representado no eixo X os dados de sucção modelados e no eixo Y os dados de sucção observados, o pior ajuste entre os métodos foi pelo Hydrus que apresentou coeficiente de determinação (R^2) de 0,96 e raiz do erro quadrático médio (RMSE) de 14,9 cm. Neste ensaio a EPR apresentou boa representatividade física, tendo em vista que os parâmetros hidráulicos calculados pela mesma apresentou boa correlação ($R^2=0.98$ e $RMSE= 11$ cm) com os dados observados.

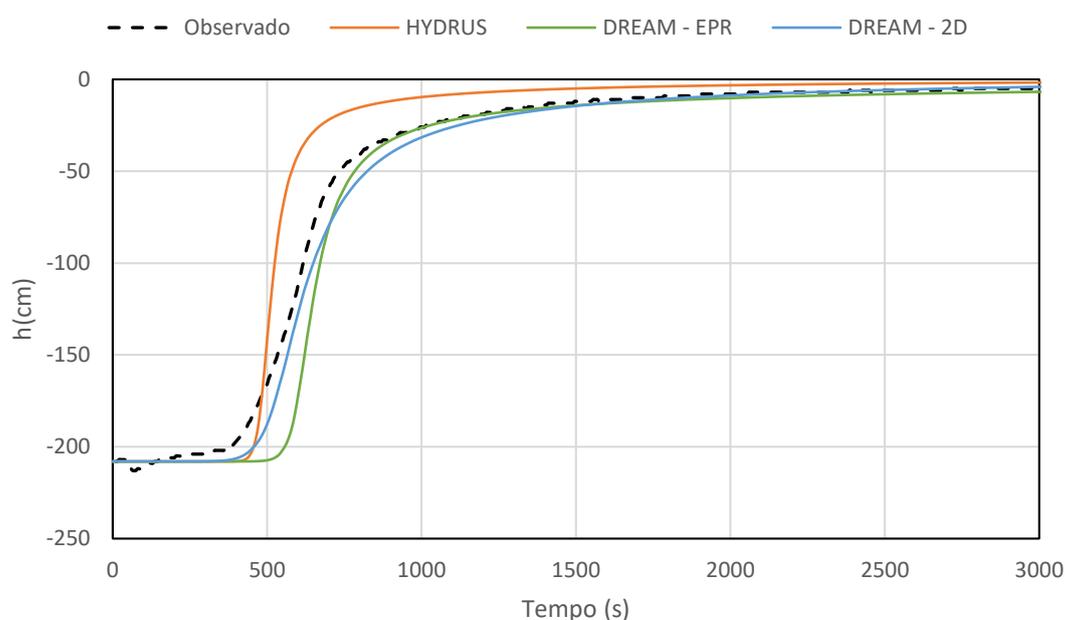


Figura 55 – Ajuste da curva de infiltração para os diferentes métodos testados - GF-01-J.

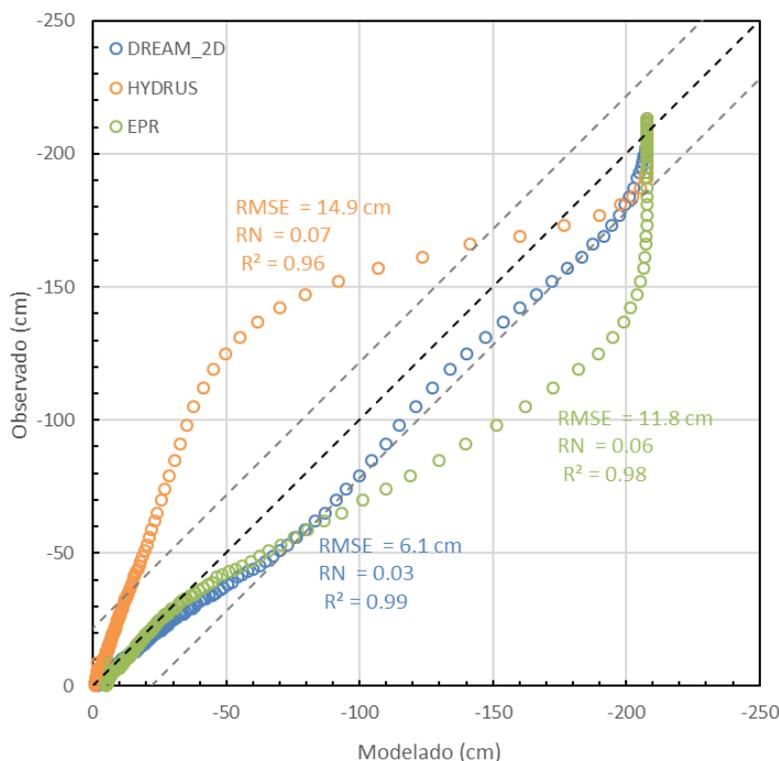


Figura 56 – Curva de calibração para os diferentes métodos testados – GF-02-J.

A matriz de correlação entre os parâmetros, apresentada na Tabela 7, indica que todos os três métodos indicaram bons resultados e baixa correlação (<0,9) entre os parâmetros calculados. Em geral o DREAM apresentou menores coeficientes de correlação, especificamente o método utilizando a EPR, tendo em vista que foram utilizados mais cadeias e gerações.

Tabela 7 – Matriz de correlação entre os parâmetros retroanalizados – GF-02-J

HYDRUS					DREAM - HYDRUS					DREAM - EPR				
	θ_r	θ_S	α	n		θ_r	θ_S	α	n		θ_r	θ_S	α	n
θ_S	0.63				θ_S	0.05				θ_S	0.14			
α	-0.09	-0.07			α	0.25	-0.33			α	-0.24	-0.51		
n	-0.11	0.04	0.7		n	0.25	-0.37	0.98		n	0.06	0.25	0.06	
k	-0.66	0	0.56	0.45	k	-0.83	0.41	-0.07	0.1	k	0.08	0.2	-0.32	0.04

5.2.4.GF-03-M

Para a realização deste ensaio foi utilizado um tensiômetro e dois sensores de umidade, conforme geometria apresentada na Figura 57. No entanto, o sensor de umidade na posição H quebrou ao ser cravado no solo devido a rigidez do mesmo. Deste modo, estão apresentados apenas os resultados do sensor de umidade na posição V e do tensiômetro. Observa-se que houve semelhança entre as duas curvas analisadas, sendo que o momento da chegada da frente de saturação foi captada simultaneamente pelos dois sensores, que foram posicionado simetricamente.

Este ensaio apresentou curta duração, de aproximadamente 300 s até a saturação total do ponto monitorado. A sucção inicial foi de aproximadamente 90 cm, enquanto a umidade volumétrica de aproximadamente 17%.

A distribuição prévia obtida pelo programa Rosetta está apresentada na Figura 58, e ilustra a faixa de incerteza onde serão avaliados os valores dos parâmetros ótimos.

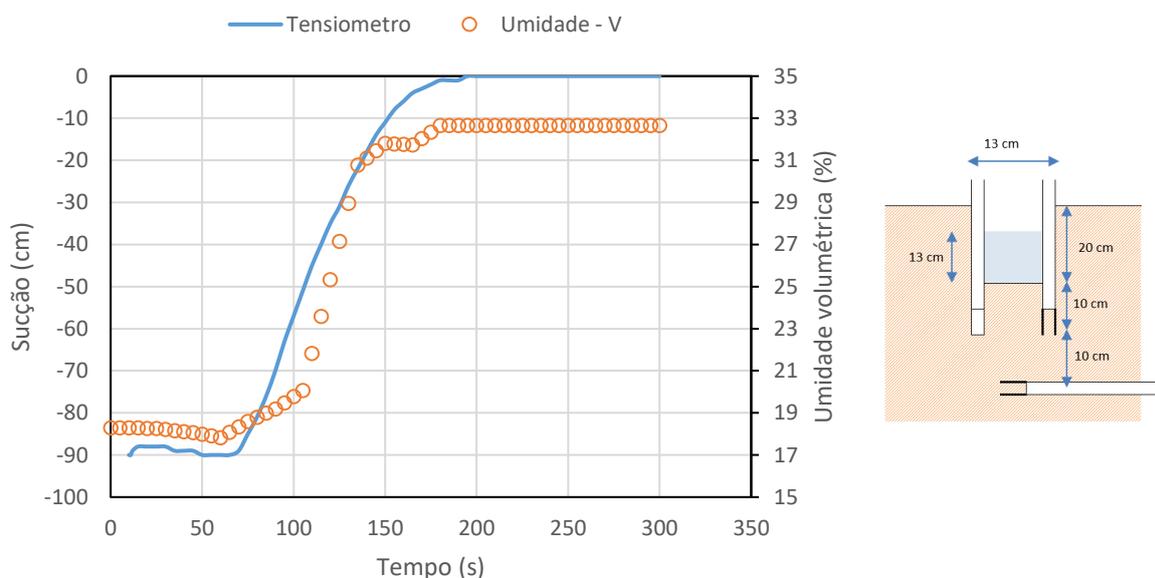


Figura 57 – Variação da sucção e umidade volumétrica e geometria do ensaio – GF-03-M

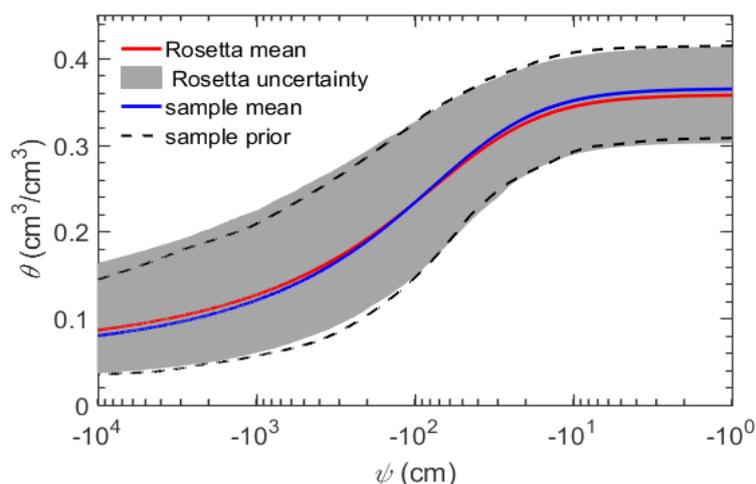
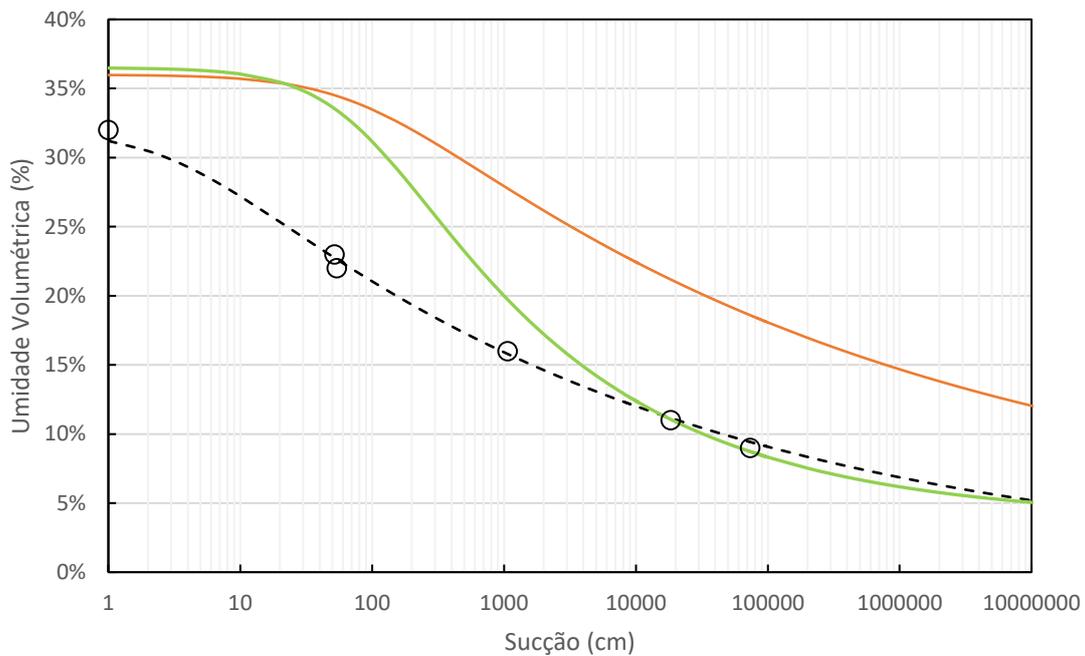
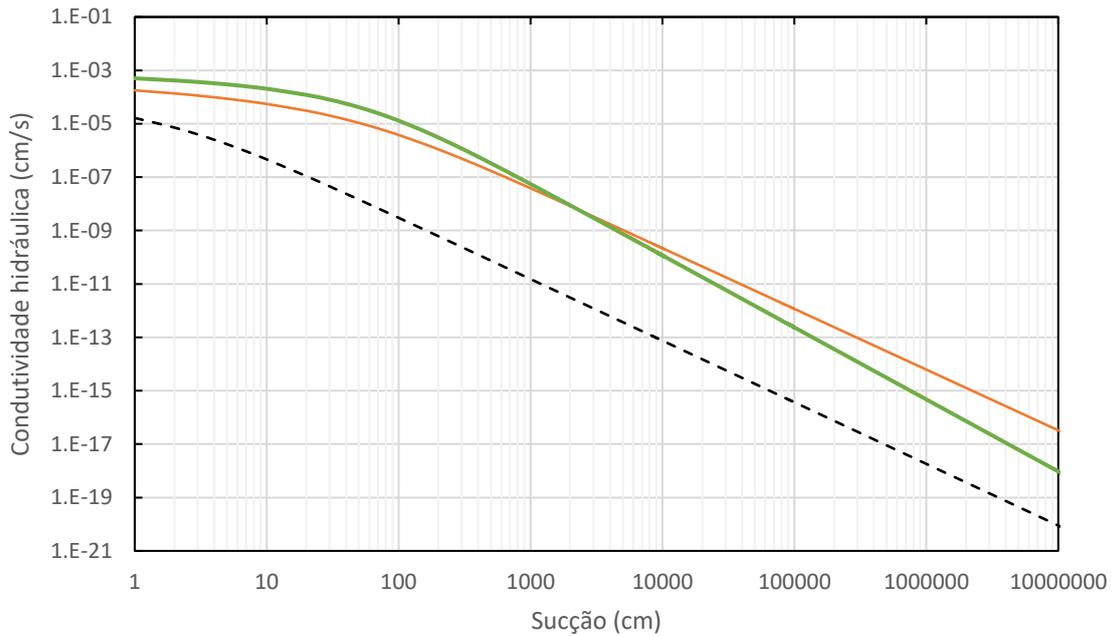


Figura 58 – Distribuição prévia dos parâmetros hidráulicos não saturados – GF-03-M.

A retroanálise através do DREAM utilizando o modelo numérico do HYDRUS não convergiu neste ensaio. Foi utilizado um limite de 1000 gerações e 8 cadeias de Markov o que resultou em aproximadamente 30 horas de simulação, não se mostrando uma ferramenta adequada para este ensaio. Desta forma, foi avaliado apenas os resultados obtidos através da análise inversa do Hydrus e através da DREAM utilizando a solução analítica obtida pela Regressão Polinomial Evolucionária (EPR). Os resultados das curvas características retroanalizadas estão apresentadas na Figura 59 e na Tabela 8, onde para efeitos comparativos está também representada a curva característica obtida através do ensaio de papel filtro.

Os dois métodos utilizados para estimativas dos parâmetros apontaram aproximadamente a mesma umidade volumétrica saturada e residual, no entanto se diferenciaram no que se refere aos demais parâmetros (θ , α e n). No entanto, mesmo os resultados da umidade volumétrica saturada tenham sido coerentes entre os dois métodos de retroanálise, é possível notar uma discrepância entre a porosidade e consequentemente na umidade volumétrica obtida pelo ensaio de papel filtro.



--- Papel Filtro — Hydrus - Inverso — EPR ○ Pontos_PF

Figura 59 - Consolidação das curvas características obtidas pelos diferentes métodos de análise, estando representado em laranja a curva obtida pela análise inversa do Hydrus, em verde a curva obtida pelo DREAM conjugado com o Hydrus 2D, em verde a curva obtida pelo DREAM utilizando o modelo substituto (EPR) e a linha tracejada ilustra a curva característica obtida em laboratório pelo método do papel filtro.

Tabela 8 – Parâmetro hidráulicos calculados pelos diferentes métodos utilizados - GF-03-M.

	Papel Filtro	Hydrus	EPR
θ_{RES}	0.001	0.029	0.038
θ_{SAT}	0.32	0.36	0.365
α (1/cm)	0.3	0.01	0.012
n	1.12	1.11	1.28
m	0.11	0.099	0.218
k_{Sat}	-	1.20E-03	1.00E-03

As curvas de infiltração modeladas utilizando os parâmetros calculados através de cada método, estão ilustradas na Figura 60. Nota-se que a curva retroanalizada pelo HYDRUS apresentou melhor ajuste com os dados observados, em contrapartida a solução analítica elaborada pela EPR não representou adequadamente os dados observado em campo. Conforme pode ser constatado na Figura 51, que apresenta o gráfico de calibração entre os métodos, estando representado no eixo X os dados de sucção modelados e no eixo Y os dados de sucção observados, a solução pelo Hydrus apresentou um bom ajuste com coeficiente de determinação (R^2) de 0,99 e raiz do erro quadrático médio (RMSE) de 6,2 cm. Neste ensaio a EPR não apresentou boa representatividade física, tendo em vista que a curva de infiltração a partir deste método não apresentou boa correlação ($R^2=0.86$ e $RMSE= 29,8$ cm) com os dados observados.

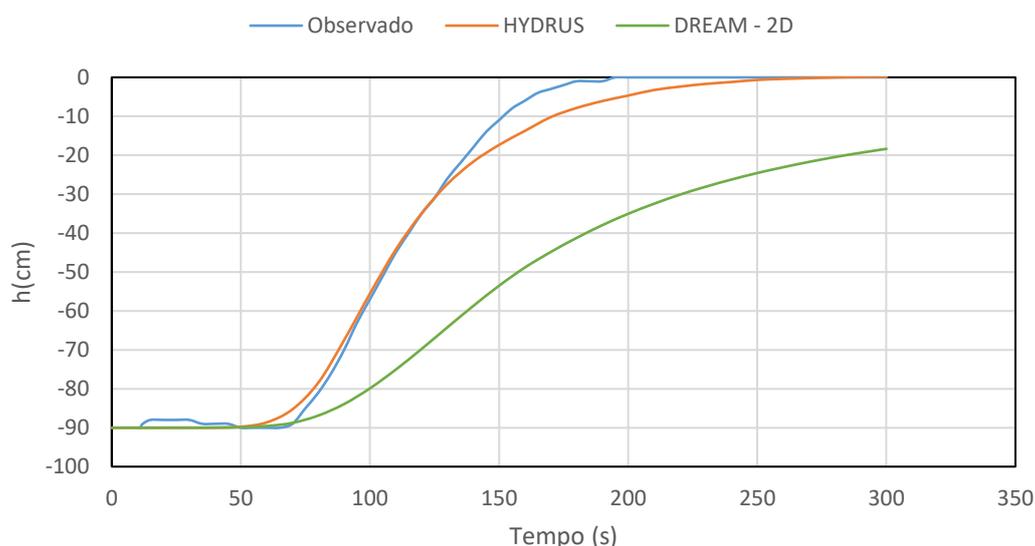


Figura 60 – Ajuste da curva de infiltração para os diferentes métodos testados - GF-03-M.

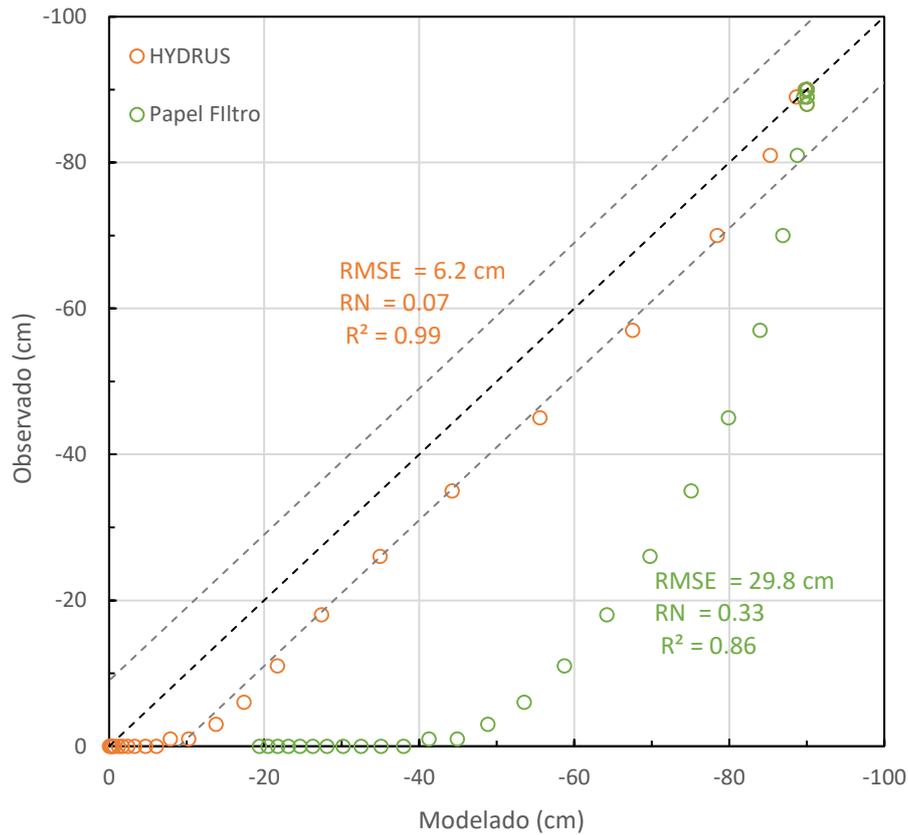


Figura 61 – Curva de calibração para os diferentes métodos testados – GF-03-M.

A matriz de correlação entre os parâmetros, apresentada na Tabela 9, indica que todos os dois métodos indicaram bons resultados e baixa correlação (<0,9) entre todos os parâmetros calculados. Em geral o DREAM apresentou menores coeficientes de correlação.

Tabela 9 – Matriz de correlação entre os parâmetros retroanalizados – GF-03-M

HYDRUS					DREAM - EPR				
	θ_r	θ_S	α	n		θ_r	θ_S	α	n
θ_S	-0.22				θ_S	0.72			
α	0.56	-0.79			α	-0.07	-0.46		
n	0.54	-0.5	0.67		n	0.57	-0.12	0.44	
k	-0.19	0.37	-0.01	0.29	k	0.22	0.15	0.35	0.32

5.2.5. Colúvio

No ensaio realizado no colúvio foi utilizado apenas um tensiômetro. Conforme ilustrado na Figura 62, a sucção inicial deste ensaio foi superior aos demais ensaios atingindo aproximadamente -600 cm.

A distribuição prévia dos valores de θ_s deste ensaio foi fixada entre 40% e 52%, de modo a representar a porosidade do colúvio obtida em laboratório. Os demais parâmetros iniciais foram obtidos a partir do programa Rosetta conforme apresentado na Figura 63, que ilustra a faixa de incerteza onde serão avaliados os valores dos parâmetros ótimos.

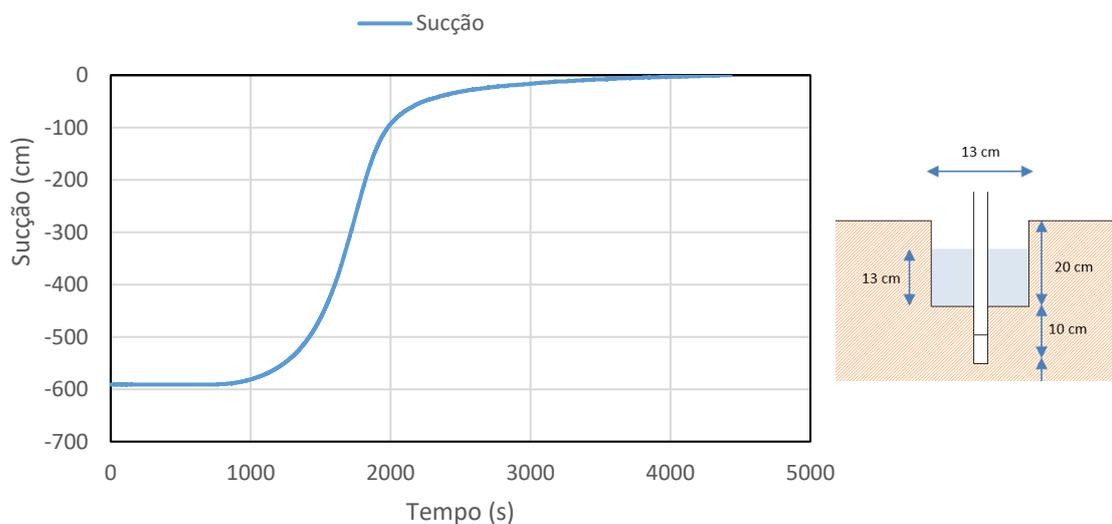


Figura 62 – Variação da sucção e da umidade volumétrica e geometria do ensaio– Colúvio.

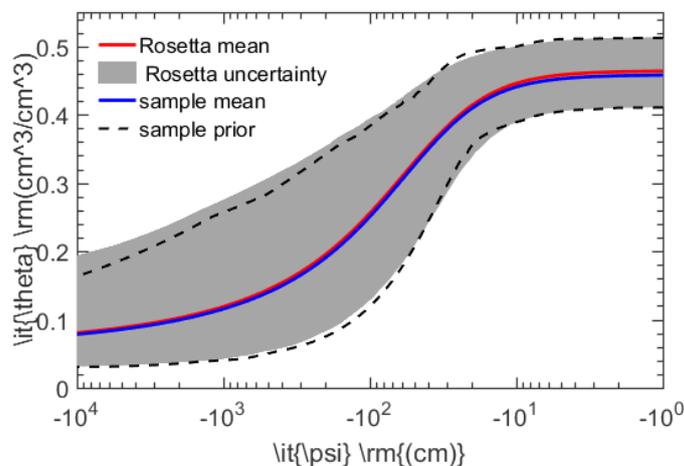


Figura 63 – Distribuição prévia dos parâmetros hidráulicos não saturados – Colúvio.

Assim como o ensaio GF-03-M, a retroanálise pelo DREAM utilizando o HYDRUS não convergiu utilizando 1000 cadeias e 8 gerações, além disso o tempo de cálculo superou 48 horas de cálculo não viabilizando realizar outras tentativas com um número maior de cadeias. Desta forma, foi avaliado apenas os resultados obtidos através da análise inversa do Hydrus e através da DREAM utilizando a solução analítica obtida pela Regressão Polinomial Evolucionária (EPR).

Como pode ser constatado na Tabela 10 e na Figura 64, que apresenta a consolidação das curvas características obtidas, a retroanálise pelo Hydrus apresentou aproximadamente a mesma umidade volumétrica saturada e residual, no entanto se diferenciaram no que se refere aos demais parâmetros e principalmente no valor de entrada ar. Por outro lado, o valor de entrada de ar obtido pela EPR apresentou valor próximo do valor através do papel filtro, porém quanto à umidade volumétrica saturada este método apresentou valores menores que os demais para estes ensaios.

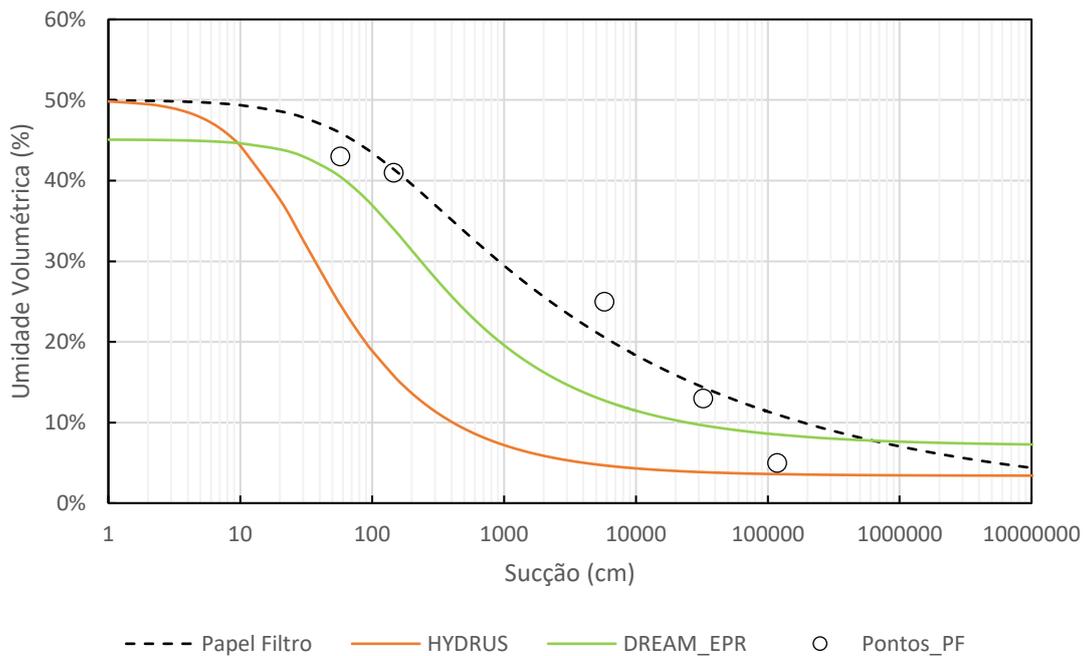
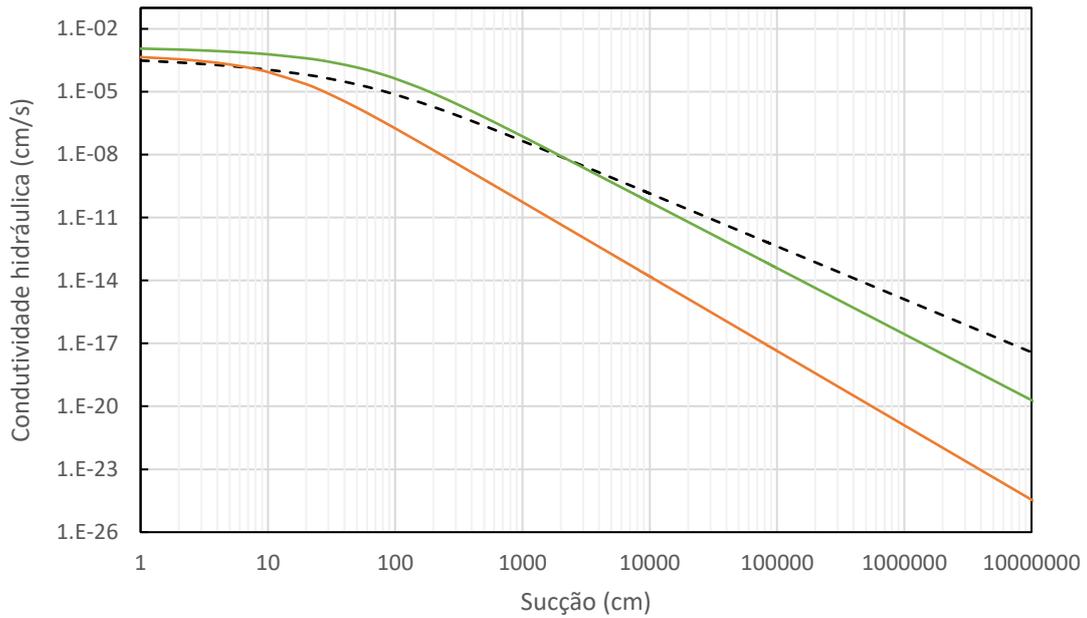


Figura 64 - Consolidação das curvas características obtidas pelos diferentes métodos de análise, estando representado em laranja a curva obtida pela análise inversa do Hydrus, em verde a curva pelo DREAM utilizando o modelo substituto (EPR) e a linha tracejada ilustra a curva característica obtida em laboratório pelo método do papel filtro.

Tabela 10 – Parâmetro hidráulicos calculados pelos diferentes métodos utilizados - GF-02-J.

	Papel Filtro	Hydrus	EPR
θ_{RES}	0.001	0.034	0.071
θ_{SAT}	0.5	0.50	0.451
α (1/cm)	0.01	0.06	0.011
n	1.21	1.62	1.46
m	0.17	0.38	0.315
k_{Sat}	-	6.50E-04	0.0015

As curvas de infiltração modeladas utilizando os parâmetros calculados através de cada método, estão ilustradas na Figura 65. Nota-se que a curva retroanalizada pelo HYDRUS apresentou melhor ajuste com os dados observados, em contrapartida a solução analítica elaborada pela EPR não representou adequadamente os dados observado em campo. Conforme pode ser constatado na Figura 66, que apresenta o gráfico de calibração entre os métodos, estando representado no eixo X os dados de sucção modelados e no eixo Y os dados de sucção observados, a solução pelo Hydrus apresentou coeficiente de determinação (R^2) de 0,96 e raiz do erro quadrático médio (RMSE) elevado de 49,8 cm. Neste ensaio a EPR não apresentou boa representatividade física, tendo em vista que a curva de infiltração a partir deste método não apresentou boa correlação ($R^2=0.17$ e $RMSE= 284$ cm).

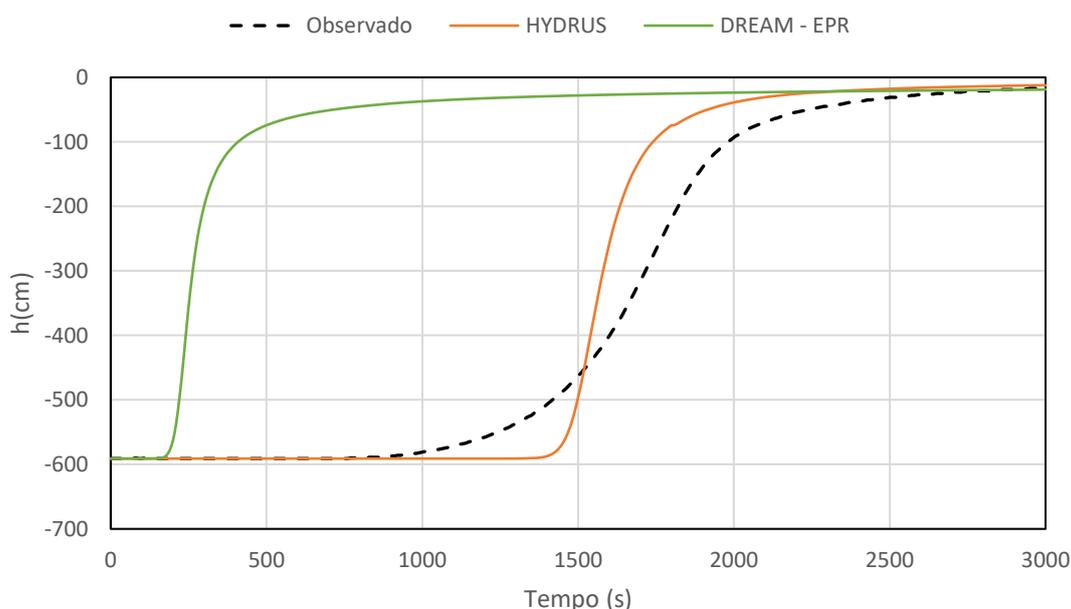


Figura 65 – Ajuste da curva de infiltração para os diferentes métodos testados - GF-01-J.

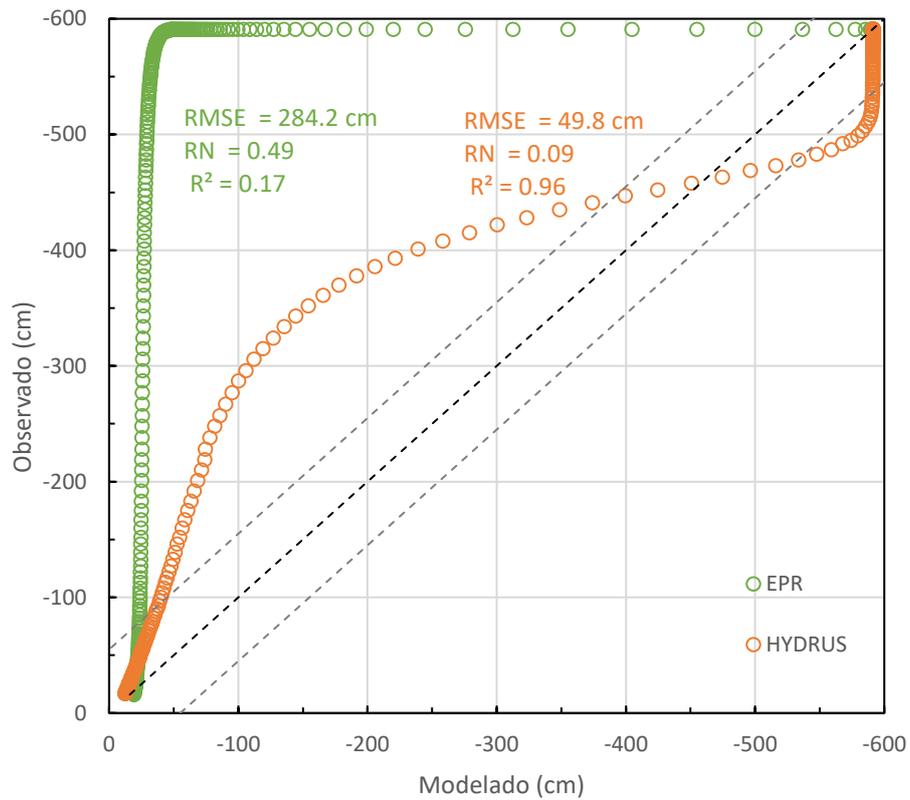


Figura 66 – Curva de calibração para os diferentes métodos testados – GF-01-J.

A Tabela 11 apresenta os coeficientes de correlação para os dois métodos. Observa-se que os modelos apresentaram baixa correlação entre os parâmetros, não superando 0,9.

Tabela 11 – Matriz de correlação entre os parâmetros retroanalizados – Colúvio.

	HYDRUS				DREAM - EPR				
	θ_r	θ_S	n	k		θ_r	θ_S	n	k
θ_S	0.22				θ_S	0.47			
α	-0.06	0.2			α	-0.06	0.01		
n	-0.3	0.76	0.43		n	-0.52	0.21	0.27	
k	-0.44	-0.59	0.24	-0.44	k	0.02	-0.67	-0.07	-0.29

5.3. Resultados dos ensaios de permeabilidade saturada

Os ensaios de permeabilidade saturada realizados com o permeâmetro de carga constante automatizado resultaram nos valores de permeabilidade saturada (K_{sat}) apresentados na Tabela 12.

Constatou-se que, em geral, os solos arenosos ensaiados apresentaram elevadas permeabilidades variando entre $3,09 \times 10^{-4}$ cm/s e $6,59 \times 10^{-4}$ cm/s.

Os resultados da permeabilidade saturada obtida através do permeâmetro apresentaram valores concordantes com valores obtidos nos EIM, como mostrado na Tabela 12. Em geral a permeabilidade saturada obtida pelo permeâmetro apresentou valores menores do que os calculados através da retroanálise, principalmente quando comparado com o método da EPR, tendo em vista que este apresentou as maiores permeabilidades saturadas calculadas.

Tabela 12 – Resultados do ensaio de permeabilidade saturada com permeâmetro de carga constante.

Ensaio		GF-01-J	GF-02-J	GF-03-M	Colúvio
K (cm/sec)	Permeâmetro	4.3 E-04	3.0 e-04	6.59E-04	8.42E-04
	HYDRUS	1.1 e-03	8.3 e-04	1.2 e-03	6.5 e-04
	DREAM / HYDRUS	8.0 e-04	5.8 e-04	-	-
	DREAM / EPR	1.1 e-02	1.0 e-03	1.0 e-03	1.5 e-03

5.4. Adição dos resultados de teor de umidade volumétrica no EIM

Neste item estão apresentados os resultados da retroanálise considerando a variação da umidade volumétrica monitorada pelos sensores de umidade do solo. Apenas os ensaios GF-02-J e GF-03-M apresentaram resultados satisfatório de monitoramento, conforme citado no item anterior e, portanto, somente serão apresentados os resultados destes dois ensaios.

5.4.1.GF-02-J

Neste ensaio a umidade volumétrica foi monitorada em dois pontos, sendo um na posição V, i.e. diametralmente oposta, ao tensiômetro, e na posição H, 10 cm abaixo da cápsula porosa do tensiômetro e sobre o eixo de simetria do furo.

Conforme apresentado na Figura 52, o sensor instalado na posição V apresentou uma defasagem quando comparado com a frente de infiltração observada no tensiômetro. Além disso, houve uma diferença inicial de aproximadamente 3% na umidade volumétrica entre os dois sensores. Inicialmente, foi realizada a retroanálise apenas do sensor instalado na posição H juntamente com o tensiômetro, tendo em vista que apresentaram leituras mais consistentes.

A retroanálise apresentou bom ajustes com os dados observados, como pode ser constatado no gráfico da Figura 67, que apresenta a variação da sucção e da umidade monitorada no tensiômetro e no sensor de umidade na posição H.

Posteriormente, tentou-se o ajuste dos dados observados considerando a umidade volumétrica monitorada pelos dois sensores de umidade e a sucção monitorada com o tensiômetro. Após inúmeras tentativas, realizando a alteração das condições iniciais e até mesmo dos parâmetros a serem ajustados não houve sucesso, conforme ilustrado na Figura 68. Este fato pode ter sido influenciado pela defasagem entre as leituras entre o tensiômetro e o sensor de umidade na posição V, uma vez que as leituras do tensiômetro se estabilizou antes da umidade no ponto simétrico.

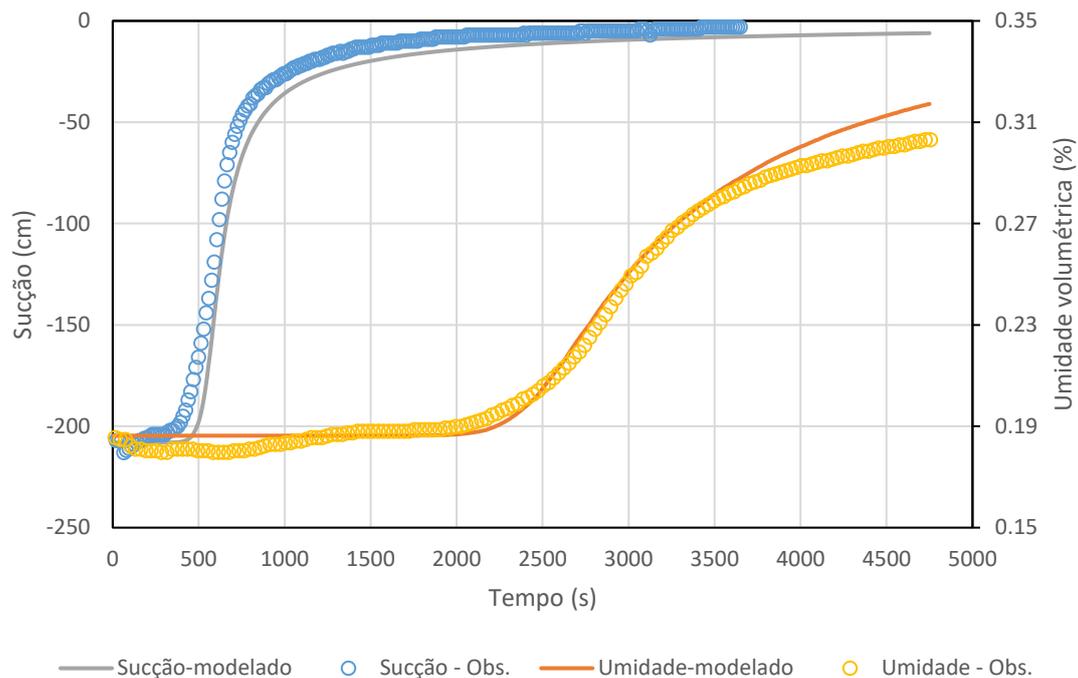


Figura 67 – Ajuste da sucção e umidade volumétrica observada e calculada com o tensiometro e o sensor de umidade na posição H.

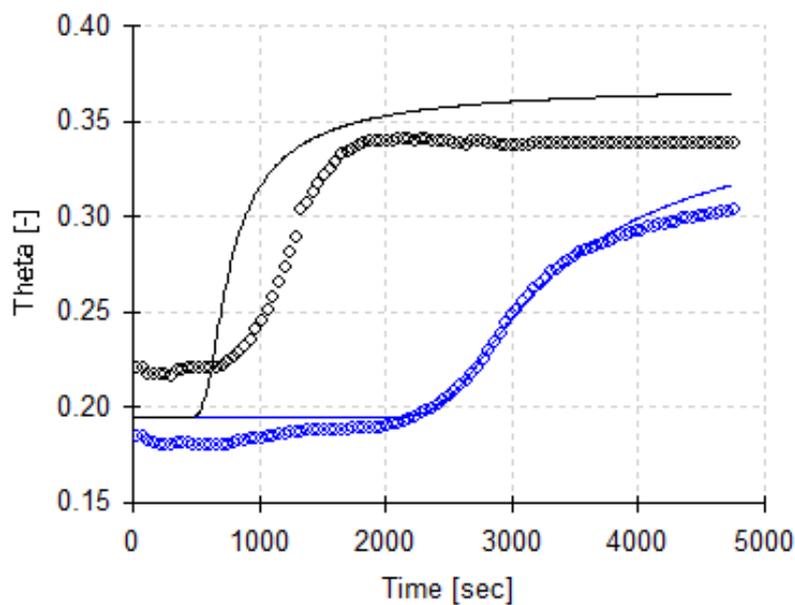


Figura 68 – Melhor ajuste considerando a umidade volumétrica observada (pontos) e modelada (linha contínua) no sensor H (azul) e no sensor V (preto).

Após a retroanálise foram obtidos os parâmetros hidráulicos não saturados e comparados com os resultados para o papel filtro e para a retroanálise apenas considerando a sucção, Figura 69 e Tabela 13. Observa-se que houve uma redução de θ_s , se distanciando ainda mais do resultado obtido pelo papel filtro. Além disso, houve um aumento da umidade volumétrica residual. Houve também uma redução da permeabilidade calculada. Os demais parâmetros não apresentaram alterações significativas.

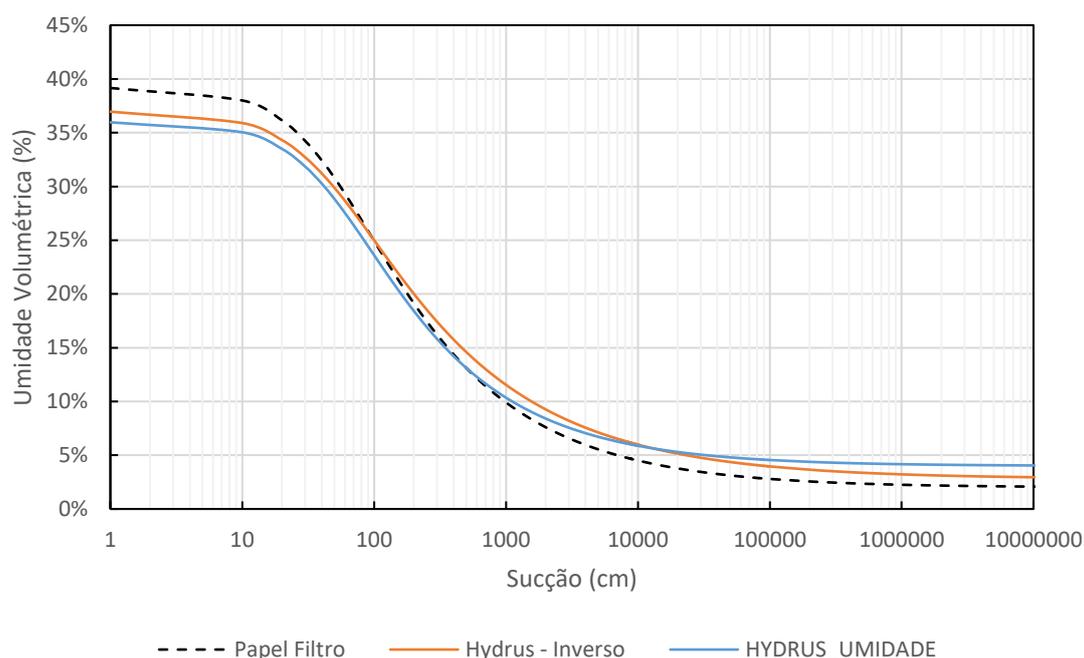


Figura 69 – Curvas características considerando os resultados do Hydrus considerando a umidade.

Tabela 13 – Parâmetro hidráulicos calculados considerando a umidade volumétrica - GF-02-J.

	Papel Filtro	Hydrus Sucção	Hydrus Sucção e umidade
θ_{RES}	0.02	0.028	0.042
θ_{SAT}	0.392	0.37	0.367
α (1/cm)	0.022	0.02	0.021
n	1.50	1.44	1.59
m	0.33	0.306	0.346
k_{Sat}	-	1.22E-03	7.77E-04

Quanto a matriz de correlação, é importante notar que, diferente do que se esperava, houve um aumento do correlação entre os parâmetros calculados, e a relação entre θ_r e θ_S apresentou valor de 0,92.

Tabela 14 – Matriz de correlação considerando a umidade volumétrica monitorada.

HYDRUS					HYDRUS com umidade volumétrica				
	θ_r	θ_S	n	k		θ_r	θ_S	n	k
θ_S	0.63				θ_S	-0.13			
α	-0.09	-0.07			α	0.75	-0.49		
n	-0.11	0.04	0.7		n	0.92	0.21	0.46	
k	-0.66	0	0.56	0.45	k	-0.91	0.2	0.53	-0.84

5.4.2. GF-03-M

Neste ensaio a umidade volumétrica foi monitorada em apenas um ponto, sendo este na posição V, i.e. diametralmente oposta, ao tensiômetro.

A retroanálise apresentou bom ajustes com os dados observados, como pode ser constatado no gráfico da Figura 70, que apresenta a variação da sucção e da umidade monitorada no tensiômetro e no sensor de umidade na posição V.

Após a retroanálise foram obtidos os parâmetros hidráulicos não saturados e comparados com os resultados para o papel filtro e para a retroanálise apenas considerando a sucção, Figura 71 e Tabela 15. Observa-se que houve uma redução de θ_s , que por sua vez se aproximou dos valores obtidos de porosidade de laboratório. Além disso, houve um aumento da umidade volumétrica residual. É importante notar que houve um aumento da permeabilidade saturada calculada.

Quanto a matriz de correlação não foi notado melhora significativa considerando a umidade volumétrica, diferente do que se esperava.

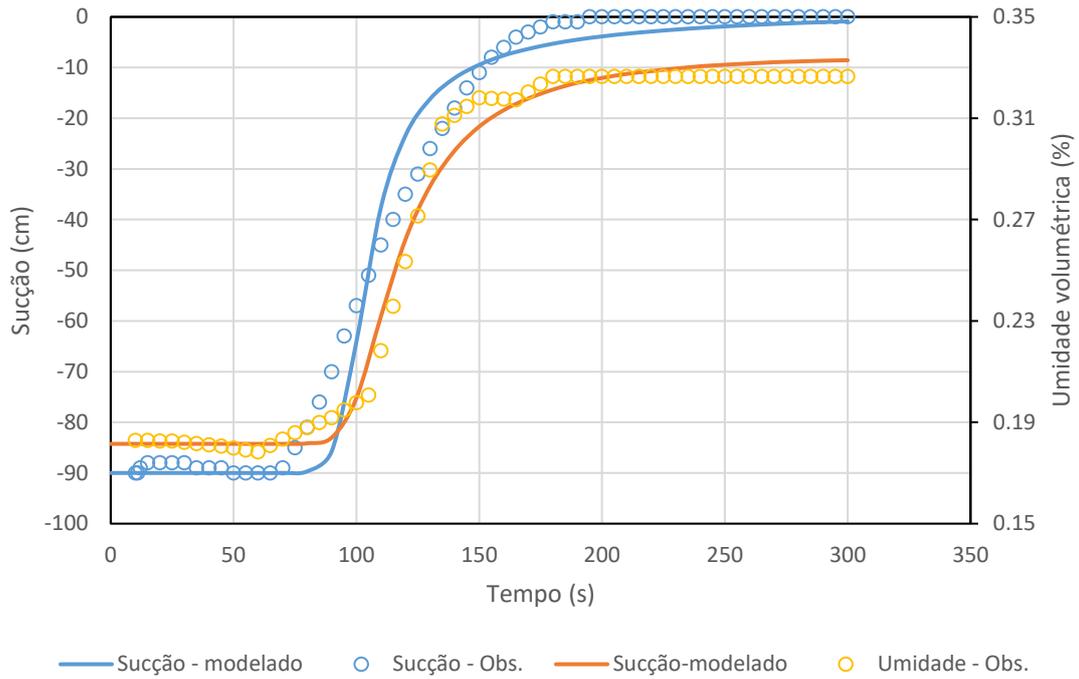


Figura 70 - Ajuste da sucção e umidade volumétrica observada e calculada com o tensiometro e o sensor de umidade na posição V.

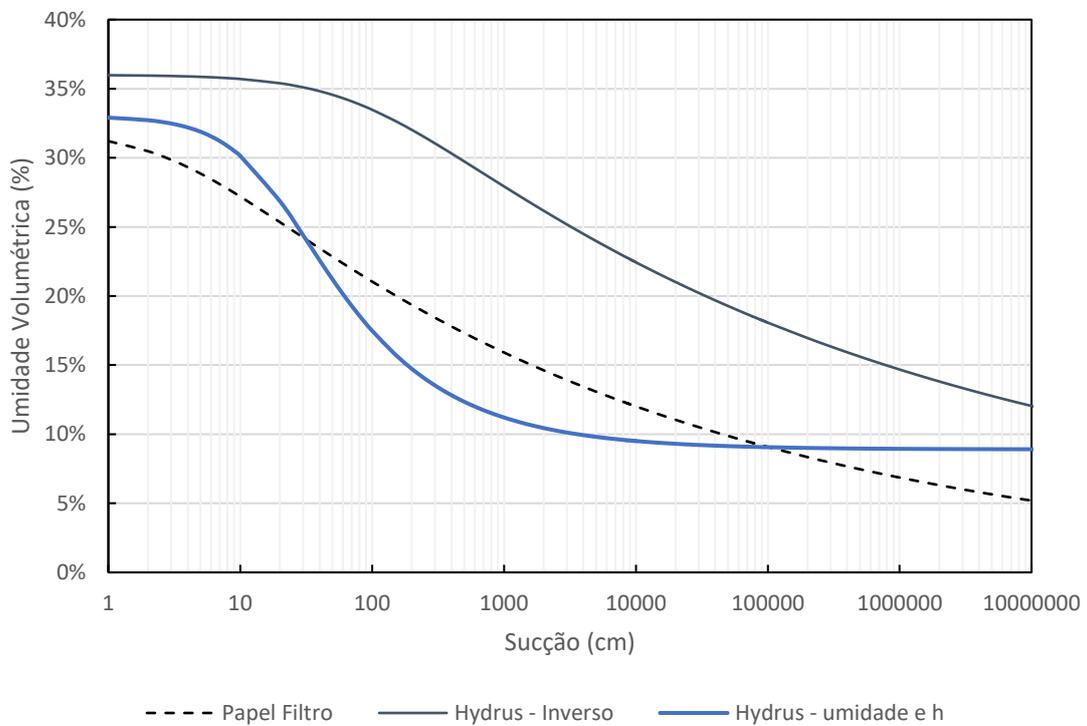


Figura 71 - Curvas características considerando os resultados do Hydrus considerando a umidade – GF-03-M.

Tabela 15 - Parâmetro hidráulicos calculados considerando a umidade volumétrica - GF-03-M.

	Papel Filtro	Hydrus Sucção	Hydrus Sucção e umidade
θ_{RES}	0.001	0.029	0.089
θ_{SAT}	0.32	0.36	0.33
α (1/cm)	0.3	0.01	0.06
n	1.12	1.11	1.58
m	0.11	0.099	0.367
k_{Sat}	-	1.20E-03	4.3E-03

Tabela 16 - Matriz de correlação considerando a umidade volumétrica monitorada.

HYDRUS					HYDRUS – com umidade				
	θ_r	θ_S	α	n		θ_r	θ_S	α	n
θ_S	-0.22				θ_S	-0.04			
α	0.56	-0.79			α	-0.28	-0.53		
n	0.54	-0.5	0.67		n	0.85	0.30	-0.61	
k	-0.19	0.37	-0.01	0.29	k	-0.75	0.25	0.37	-0.51

6 Considerações finais

O presente trabalho alcançou as seguintes conclusões:

- A realização de EIM em que as condições iniciais de sucção se aproximem do valor de entrada de ar da cápsula porosa devem ser avaliados com cautela e, se possível, deve ser avaliado a sucção inicial através de outro método, como o de papel filtro.
- A utilização da Regressão Polinomial Evolucionária (EPR) para a geração de um modelo analítico apresentou um bom potencial para a utilização junto com o DREAM, tendo em vista que o tempo de cálculo é reduzido possibilitando a utilização de um maior número de gerações. No entanto é necessário avaliar melhor a representatividade física de cada equação, fornecendo mais informações ao modelo.
- A utilização do DREAM juntamente com o Hydrus quando convergiram apresentaram bons resultados, no entanto devido ao elevado tempo de cálculo (entre 10 h e 48 h para 8 cadeias e 1000 gerações) foi utilizado um baixo número de gerações e cadeias de Markov.
- A matriz de correlação entre os parâmetros, em geral, indicou que os três métodos de retroanálise apresentaram baixa correlação (<0,9) entre os parâmetros calculados.
- A utilização do permeâmetro de Guelph automatizado apresentou bons resultados quando comparados com os resultados obtidos através da retroanálise dos EIM.
- A adição de dados de umidade obtidos através dos sensores de umidade de solo não apresentou melhora na matriz de correlação entre os parâmetros.
- A geometria do ensaio considerando o sensor de umidade posicionado diametralmente oposto ao tensiômetro não apresentou bons resultados, tendo em vista que o tempo de resposta dos dois equipamentos é diferente. Isto é, poros menores continuaram a receber umidade muito tempo após a passagem da frente de infiltração, subestimando a relação umidade x tensão.

- Finalmente, o EIM apresentou bons ajustes da curva característica quando comparado com ao método do papel filtro para os ensaio GF-01 e GF02, no entanto os resultados obtidos para os solos GF-03-M e Colúvio apresentaram valores diferente, principalmente para o valor de entrada de ar e θ_s .

Recomendações para estudos futuros:

- Recomenda-se incluir no modelo analítico obtido através da Regressão Polinomial Evolucionária (EPR) a variação da profundidade do ponto de monitoramento. Isto é, além de fornecer 100 curvas de infiltração para apenas uma profundidade, seriam geradas 100 análises para cada profundidade, visando representar o processo físico de infiltração.
- Recomenda-se verificar a viabilidade da avaliação da histerese através do EIM, de modo a se obter as curvas características de secagem e molhamento.
- Recomenda-se realizar mais EIM utilizando sensores de umidade de solo. Quanto ao posicionamento do mesmo, sugere-se que este seja instalado abaixo do tensiômetro tendo em vista que apresentou melhores resultados de ajuste dos dados observado com os modelados.

7 Referências bibliográficas

ACOSTA, N. P. L., PROMOTOR, J.A.M. **Study of Unsaturated Soils by Coupled Numerical Analyses of Water Flow-Slope Stability**, Groundwater - Contaminant and Resource Management, Dr. Muhammad Salik Javaid (Ed.), InTech, DOI: 10.5772/639032016, 2016.

AHANGAR-ASR, A., FARAMARZI, N, MOTTAGHIFARD, A., A. JAVARDI. **Modeling of permeability and compaction characteristics of soils using Evolutionary Polynomial Regression**. Comput. Geosci. 37, 1860-1869, 2011.

ARAÚJO, F. O. **Detecção de falta à terra no serviço auxiliar em corrente contínua das subestações de energia elétrica**. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) Universidade Federal de Santa Catarina, 2004.

BARROS FILHO, G, **Um ensaio de campo para a determinação das propriedades hidráulicas de solos não saturados**, Iniciação Científica, DEC/PUC-Rio, 2004.

BEAR, J. **Dynamics of fluids in porous media**. Elsevier, New York, 1972.

BITTELLI, M; FLURY, M. **Errors in water retention curves determined with pressure plates**, Soil Sci. Soc. Am. J., 73, 1453–1460, 2009.

BROOKS, R. H; COREY, A. T. **Hydraulic properties of porous media**, **Colorado State University Hydrology Paper**, (3): 8-37, 1964.

CARVALHO, J. C et. al. **Solos não saturados no contexto geotécnico**. **Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica** – São Paulo 759 p., 2015.

CHENG, Q. **Evaluating the Effect of Objective Functions on Model Calibration**. Dissertação. Dissertação de mestrado em Hidrogeologia. Freien Universität Berlin, 2014.

DELGADO, C. W. C., **Resistência ao Cisalhamento dos Solos Coluvionares e Residuais Não Saturados da Vista Chinesa**, Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio, Rio de Janeiro, 1993.

ELRICK, D.E., REYNOLDS, W.D. **Methods for analyzing constant head permeameter data.** *Soil. Sci. Soc. Am. J.*, v. 56, pp. 320-323, 1992.

ELRICK, D.; REYNOLDS, W. D., & Tan, K. A. **Hydraulic conductivity measurements in the unsaturated zone using improved well analyses.** *Ground water monitoring and remediation* v. 9, pp. 184 - 193, 1989.

ENGL, H., W., HANKE, M., NEUBAUER, A. **Regularization of Inverse Problems: Mathematics and its Applications**, 1996.

FREDLUND, D. G., RAHARDJO, H. **Soil mechanics for unsaturated soils.** New York: John Wiley & Sons, 1993.

FREDLUND, D., G, XING, A. **Modeling of permeability and compaction characteristics of soils using evolutionary polynomial regression**, 1994.

GEESING, D., BACHMAIER, M., SCHMIDHALTER, U. **Field calibration of a capacitance soil water probe in heterogeneous fields.** *Australian Journal of Soil Research*, v. 42, n. 3, p. 289-299, 2004.

GIUSTOLISI, O, SAVIĆ, D.A.A **Symbolic Data-Driven Technique Based on Evolutionary Polynomial Regression**, *Journal of Hydroinformatics*, Vol. 8, No. 3, pp. 207-222, 2006.

GOMES, G.J.C., et al. **Computer Program for Integrating Probabilistic 3D Unsaturated Flow Simulations and Numerical Limit Analysis.** XVIII Brazilian Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering the Sustainable Future of Brazil goes through our Minas COBRAMSEG 2016 – BH, MG, 2016.

GOMES, G.J.C. **Modelagem da interface solo-rocha utilizando inferência Bayesiana.** Tese (Doutorado em Engenharia Civil – Geotecnia). PUC – RJ, 2016.

GRIBB, M. M. **Parameter estimation for determining hydraulic properties of a fine sand from transient flow measurements**, *Water Resource Research*, 32(7), 1996.

HUISMAN, J., et al. **Hydraulic properties of a model dike from coupled Bayesian and multi-criteria hydrogeophysical inversion**, 2010.

KLUTE, A., DIRKSEN, C. **Hydraulic conductivity and diffusivity: laboratory methods**, in: **Methods of Soil Analysis**, Part 1. Physical and Mineralogical Methods, edited by: Klute, A., 2nd Edn., ASA and SSSA, Madison, WI, 687–734, 1986.

KODESOVÁ, R. **Determination of Hydraulic Properties of Unsaturated Soil via Inverse Modeling**, 2003.

KODESOVÁ, R., GRIBB, M., SIMUNEK, J. **Estimating soil hydraulic properties from transient cone permeameter data**. *Soil Science* , v. 163, pp. 436-453, 1998.

LALOY, E., et al. **Efficient posterior exploration of a high-dimensional groundwater model from two-stage Markov chain Monte Carlo simulation and polynomial chaos expansion**, 2013.

LEONG, E. C., RAHARDJO, H. **Review of soil-water characteristic curve**. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, v. 123, n. 12, 1997.

LIM, T., RAHARDJO, M., CHANG, F. M., FREDLUND, D. G. **Effect of rainfall on matric suctions in a residual soil slope**. *Can. Geotech. J.* , v. 33, pp. 618-628, 1996.

MICHELETTO, M. **Desenvolvimento de procedimentos numéricos para a análise de infiltração e estabilidade de taludes em bacias de drenagem**. 152 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil - Geotecnia) PUC-RJ, 2008.

MORALES, M.S.T. **Estudo Numérico e Experimental de Problemas de Fluxo Saturado – Não Saturado em solos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil - Geotecnia). PUC- RJ, 2008.

NEUMAN, S.P. **Saturated-unsaturated seepage by finite elements** - *J. Hyd. Div. ASCE*, V. 99, N. 12, 2233-2250, 1973.

NUNES, C.M.F. **Aplicações do GRP. (Ground Penetrating Radar) na Caracterização de Perfis de Aletração de Rochas Gnaissicas do Rio de Janeiro**, 140p. Dissertação de Mestrado - DEC/PUC-Rio, 2002.

PINTO, J. L. T. M. G. **Determinação das propriedades hidráulicas de solos residuais do Rio de Janeiro. Dissertação** (Mestrado em Engenharia Civil - Geotecnia). PUC- RJ, 2013.

PIZETTA, S. C. **Calibração de Sensores de Capacitância (Fdr) para Estimativa da Umidade em Diferentes Solos** (Mestrado em Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas). UFLA, 2015.

RICHARDS, L. A., **Capillary conduction of liquids in porous media**, Physics I, p.318-333, 1931.

RODRIGUEZ, J. J. **Field measurements of flow in partly saturated residual soil**. MSc Dissertation. Imperial College of Science, Technology & Medicin, 1998.

SCHAAP, M. G., F. J. LEIJ, e M. Th. VAN GENUCHTEN, **Neural network analysis for hierarchical prediction of soil hydraulic properties**, Soil Science Society of America Journal, 62(4):847- 855, 1998.

SCHARNAGL, B, et. al. **Inverse modelling of in situ soil water dynamics: investigating the effect of different prior distributions of the soil hydraulic parameters**, 2011.

SEYFRIED, M. S, MURDOCK, M. D. **Measurement of Soil Water Content with a 50 MHz Soil Dielectric Sensor**. **Soil Science Society of America**, v. 68, n. 2, p. 394-403, 2004.

SHEN, M., et al. **Laboratory Research of Soil Water Characteristic Curve by Osmotic Method and Filter Paper Method**. Vol.18, 2013.

SIMUNEK, J., GRIBB, M., M, KODESOVÁ, R., VAN GENUCHTEN, M., T. **Estimating hysteresis in the soil water retention function from cone permeameter experiments**, 1999.

SIMUNEK, J., et al. **Parameter estimation of unsaturated soil hydraulic properties from transient flow processes**, 1998.

SIMUNEK, J., et al.. **HYDRUS TECHNICAL MANUAL – VERSION 2. Software Package for Simulating the Two- and Three-Dimensional Movement of Water, Heat and Multiple Solutes in Variably-Saturated Media**, Praga-República Tcheca, 2011, 2014.

SIMUNEK, J., et al. **HYDRUS: Model use**, Calibration and Validation, 2012.

SCOTT, R., L, et al. **Modeling multiyear observations of soil moisture recharge in the semiarid American Southwest**, 2000.

SILVA, A. M. da. **Banco de dados de curvas de retenção de água de solos brasileiros. 2005.** 141 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

_____. **Validação de um Sensor de Determinação da Umidade do Solo para o Manejo da Irrigação.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). UNIVASF, 2013.

SOARES, R. M., **Resistência ao Cisalhamento de um Solo Coluvionar Não Saturado do Rio de Janeiro**, Rio de Janeiro, 214 p. Dissertação de Mestrado - DEC/PUC-Rio, 2005.

VAN GENUCHTEN, M., T. **A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soil.** Soil Science Society of America Journal, 44(5): 892-898, 1980.

VELDKAMP, E., O'BRIEN, J. J. **Calibration of a frequency domain reflectometry sensor for humid tropical soils of volcanic origin.** Soil Science Society of America, v. 64, n. 5, p. 1549-1553, 2000.

VELLOSO, R., Q. **Estudo Numérico da Estimativa de Parâmetros Hidráulicos em Solos Parcialmente Saturados.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil-Geotécnia) PUC -RJ, 2000.

VIEIRA, B., FERNANDES, N. **Landslides in Rio de Janeiro: The role played by variations in soil hydraulic conductivity.** Hydrol. Process, v. 18, pp. 791-805, 2004.

VRUGT, J. A. **Markov chain Monte Carlo simulation using the DREAM software package:** Theory, concepts, and MATLAB implementation. Environmental Modelling & Software, v. 75, p. 273-316, 2016.

VRUGT, J. A., et al. **Treatment of input uncertainty in hydrologic modeling: Doing hydrology backward with Markov chain Monte Carlo simulation,** 2007.

WALKER, J. P., WILLGOOSE, G. R., KALMA, J. D. **In situ measurement of soil moisture: A comparison of techniques.** Journal of Hydrologia, v. 293, n. 1, p. 85-99, 2004.

ZACHMANN, D.W., et al. **The calibration of the Richards flow equation for draining column by parameter identification.** Soil Sci. Soc. Am., J., 45, 1012-1015, 1981.

ZHANG, L.; et al. **Probabilistic parameter estimation and predictive uncertainty based on field measurements for unsaturated soil slope**, 2013.