



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CATALÃO – UFCAT
UNIDADE ACADÊMICA ESPECIAL DE MATEMÁTICA E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MODELAGEM E OTIMIZAÇÃO



José Carlos Campos Gonçalves Filho

ANÁLISE NUMÉRICA DE METODOS EMPÍRICOS DO ESTUDO DA
CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

CATALÃO – GO, 2018

**TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR
VERSÕES ELETRÔNICAS DE TESES E DISSERTAÇÕES
NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFG**

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFG), regulamentada pela Resolução CEPEC nº 832/2007, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei nº 9610/98, o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou *download*, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

1. Identificação do material bibliográfico: Dissertação Tese

2. Identificação da Tese ou Dissertação:

Nome completo do autor: JOSÉ CARLOS CAMPOS GONÇALVES FILHO

Título do trabalho: ANÁLISE NUMÉRICA DE MÉTODOS EMPÍRICOS DO ESTUDO DA CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA

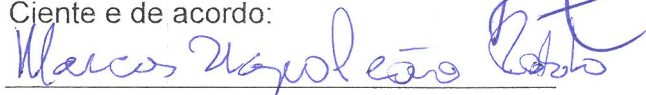
3. Informações de acesso ao documento:

Concorda com a liberação total do documento SIM NÃO¹

Havendo concordância com a disponibilização eletrônica, torna-se imprescindível o envio do(s) arquivo(s) em formato digital PDF da tese ou dissertação.

Assinatura do(a) autor(a)²

Ciente e de acordo:



Assinatura do(a) orientador(a)²

Data: 30 / 10 / 2018

¹ Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. A extensão deste prazo suscita justificativa junto à coordenação do curso. Os dados do documento não serão disponibilizados durante o período de embargo.

Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro;
- Publicação da dissertação/tese em livro.

² A assinatura deve ser escaneada.

JOSÉ CARLOS CAMPOS GONÇALVES FILHO

ANÁLISE NUMÉRICA DE METODOS EMPÍRICOS DO ESTUDO DA
CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA

Dissertação apresentada como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Modelagem e Otimização pela Universidade Federal de Catalão – UFCat.

Orientador:

Marcos Napoleão Rabelo

Coorientadora:

Nome da Coorientadora

CATALÃO – GO

2018

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do
Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

Campos Gonçalves Filho, José Carlos
Análise numérica de metodos empíricos do estudo da
condutividade hidráulica [manuscrito] / José Carlos Campos
Gonçalves Filho. - 2018.
CVI, 106 f.: il.

Orientador: Prof. Marcos Napoleão Rabelo.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Goiás, Unidade
Acadêmica Especial de Matemática e Tecnologia, Catalão,
Programa de Pós-Graduação em Modelagem e Otimização, Catalão, 2018.
Bibliografia. Apêndice.
Inclui fotografias, tabelas, algoritmos, lista de figuras, lista de
tabelas.

1. Coeficiente hidráulico. 2. Granulometria. 3. Solos. 4. Umidade.
I. Napoleão Rabelo, Marcos, orient. II. Título.

CDU 628



Defesa Nº 36

Ata de Defesa Pública – Dissertação de Mestrado

Aos 28 dias do mês de setembro do ano de 2018, às 9 h: 15 min, reuniram-se os componentes da banca examinadora, professores(as) Dr.(a) Marcos Napoleão Babelo (presidente e orientador), Dr. (a) Donald Mark Sauter e Dr. (a) Tercio Alberto Santo Filho e Dr. (a) _____ para, em

sessão pública realizada na sala de apresentação do bloco da pesquisa, da Regional Catalão (RC), da Universidade Federal de Goiás (UFG), procederem com a avaliação do trabalho intitulado: "Análise Numérica de Métodos Europeus de Estudo da Condutividade Hidráulica"

, em nível de Mestrado, área de concentração Modelagem e Otimização, de autoria de José Carlos Campos Brucalves Filho, discente do Programa de Pós-Graduação em Modelagem e Otimização (PPGMO) da UFG/RC. A sessão foi aberta pelo presidente da banca, que fez a apresentação formal dos membros da banca. A seguir, a palavra foi concedida ao discente que, dentro do tempo regulamentar, procedeu a apresentação de seu trabalho. Terminada a apresentação, cada membro da banca arguiu o candidato, tendo-se adotado o sistema de diálogo sequencial. Terminada a fase de arguição, procedeu-se a avaliação do trabalho. Os membros da banca consideraram o trabalho final: () **Aprovado** ou () **Reprovado**. Cumpridas as formalidades de pauta, às 10 h: 10 min a presidência da mesa encerrou a sessão e para constar, eu Marcos Napoleão Babelo, lavrei a presente Ata que, depois de lida e aprovada, segue assinada pelos membros da banca examinadora e pelo discente e, posteriormente, será homologada pelo Colegiado do PPGMO.

Catalão-GO, 28 de setembro de 2018.

Marcos Napoleão Babelo
Prof.(a) Dr. (a): Marcos N. Babelo
Programa de Pós-Graduação em Modelagem e Otimização, UFG/RC.
(Presidente da Banca)

Donald Mark Sauter
Prof.(a) Dr. (a): Donald Mark Sauter
Instituição

Tercio Alberto Santo Filho
Prof.(a) Dr. (a): Tercio A. S. Filho
Instituição

José Carlos Campos Brucalves Filho
Discente:
Programa de Pós-Graduação em Modelagem e Otimização, UFG/RC.

Aos meus avós Ana de Matos Assis, Wanderley Assis de Mello, Alzira Campos Gonçalves, Sebastião Gonçalves (in memórian), aos meus pais Claudia Mara de Matos Aydar Gonçalves e José Carlos Campos Gonçalves (in memórian), as minhas irmãs Karen Cristina Aydar Botelho e Janaína Aydar Gonçalves (in memórian) ao meu cunhado Eduardo Balero Botelho e meus sobrinhos Yasmin Aydar Gonçalves Moura e Carlos Eduardo Aydar Gonçalves Botelho.

Agradecimentos

Primeiramente a Deus, fonte de todo conhecimento, por me iluminar e me dar forças para que eu conseguisse finalizar este trabalho com êxito.

À banca de defesa do mestrado composta por: Drº Tercio Alberto dos Santos Filho-UFCat, Drº Donald Mark Santee-UFCat e meu orientador, Profº Drº Marcos Napoleão Rabelo.

Aos Meus Parentes e aos que me auxiliaram durante todo meu processo de aprendizagem e dedicação, financeira e moralmente.

A meus Professores por todo conhecimento compartilhado e por todo apoio durante a realização deste projeto.

Principalmente ao meu orientador prof. Dr. Marcos Napoleão Rabelo, primeiramente por toda a paciência que teve comigo durante esses dois anos e meio, pela orientação inegavelmente eficiente nesta pesquisa desafiadora, pelas sugestões valiosas e por acreditar e me encorajar que a concretização deste projeto seria possível.

Aos meus amigos de Jales - SP que vieram de tão longe me visitar incansavelmente enquanto morei em Catalão - GO.

A Universidade Federal de Goiás pela oportunidade.

A FAPEG pelo auxílio financeiro.

Aos meus grandes amigos Arley Gonçalves, Daniel Félix, Michael Durval, Ricardo Teixeira e Roseane Ribeiro (em ordem alfabética) pelas palavras de otimismo e por sempre me encorajarem a seguir em frente.

Aos colegas do Mestrado pelos momentos de grande aprendizagem juntos.

“Que os vossos esforços desafiem as impossibilidades, lembrai-vos de que as grandes coisas do homem foram conquistadas do que parecia impossível.” (Charles Chaplin)

RESUMO

GONÇALVES FILHO, JOSÉ CARLOS CAMPOS. *Análise numérica de métodos empíricos do estudo da condutividade hidráulica*. 2018. 106 f. Dissertação (Mestrado em Modelagem e Otimização) – Unidade Acadêmica Especial de Matemática e Tecnologia, Universidade Federal de Catalão – UFCat, Catalão – GO.

No contexto das Ciências Agronômicas e Ambientais, a condutividade hidráulica $K(\theta)$ como função da umidade (θ) e granulometria, tem especial importância para os estudos e solução de problemas práticos relacionados com a irrigação, drenagem, lixiviação de nutrientes e poluentes, estabilidade de taludes, problemas relacionados a compactação de solo em forma geral. Serão realizados estudos que estipulam a condutividade hidráulica $K(\theta)$ a partir da distribuição granulométrica e teores de umidade para determinados tipos de solo, tendo o diâmetro das partículas como parâmetro principal para obtenção do mesmo. Uma das vantagens nesta metodologia é a redução de custos laboratoriais e o tempo reduzido se comparado a testes para obtenção destes índices físicos. O estado da arte na validação empírica tem produzido modelos numéricos para descrição de simulação dos índices físicos. Utilizando de metodologias experimentais, faremos uso de tais modelos para a validação e posterior análise de resultados para solos obtidos na UFCat. A primeira parte do trabalho será destinada ao estudo de modelos estatísticos, que relacionam o comportamento do coeficiente hidráulico com a granulometria do solo. Para esta parte do trabalho, será utilizado como referência principal o artigo (SALARASHAYERI; SIOSEMARDE, 2012). Os modelos que serão usados nesta dissertação foram obtidos em (SALARASHAYERI; SIOSEMARDE, 2012), onde os autores, por meio de 25 amostras de solo arenoso extraíram características da condutividade hidráulica. No presente caso, ensaios de laboratório mostraram que a característica do solo analisado se aproxima de um comportamento argiloso veja (GONÇALVES-FILHO *et al.*, 2017b), (GONÇALVES-FILHO *et al.*, 2017a). Para contornar este problema usaremos os gráficos gerados a partir de análises experimentais feitas por meio de sensores de umidade, para calibrar modelos estatísticos. Na segunda parte do trabalho, será feito um estudo, através de modelos que relacionam o coeficiente hidráulico com a umidade do solo. Para esta parte será usado a referência (GENUCHTEN, 1980). Em (GENUCHTEN, 1980), modelos analíticos que descrevem a relação entre coeficiente hidráulico, umidade e nível piezométrico foram obtidos. Os modelos teóricos serão validados através de comparação entre as curvas teóricas e os dados experimentais adquiridos por meio de sensores. Como parte complementar do trabalho, serão feitas simulações numéricas para analisar o comportamento do coeficiente hidráulico, com os diferentes modelos abordados.

Palavras-chaves: Coeficiente hidráulico, Granulometria, Solos, Umidade.

ABSTRACT

GONÇALVES FILHO, JOSÉ CARLOS CAMPOS. *Numerical analysis of empirical methods of the hydraulic conductivity study*. 2018. 106 f. Master Thesis in Modelling and Optimization – Unidade Acadêmica Especial de Matemática e Tecnologia, Universidade Federal de Catalão – UFCat, Catalão – GO.

In the context of Agronomic and Environmental Sciences, the hydraulic conductivity $K(\theta)$ as a function of the humidity (θ) and granulometry, is especially important for the study and solution of practical problems related to irrigation, drainage, leaching of nutrients and pollutants, slope stability, problems related to soil compaction in general. Studies will be carried out that stipulate the hydraulic conductivity $K(\theta)$ from the particle size distribution and moisture content for certain types of soil, with the particle diameter as the main parameter to obtain the same. One of the advantages in this methodology is the reduction of laboratorial costs and the reduced time when compared to tests to obtain these physical indexes. The state of the art in empirical validation has produced numerical models for simulation description of physical indices. Using experimental methodologies, we will use these models for the validation and subsequent analysis of results for soils obtained at UFCat. The first part of the work will be devoted to the study of statistical models, which relate the behavior of the hydraulic coefficient with the soil granulometry. For this part of the work, the main reference will be the article (SALARASHAYERI; SIOSEMARDE, 2012). The models that will be used in this dissertation were obtained in (SALARASHAYERI; SIOSEMARDE, 2012), where the authors, through 25 samples of sandy soil extracted characteristics of the hydraulic conductivity. In the present case, laboratory tests have shown that the characteristic of the analyzed soil approaches a clayey behavior see (GONÇALVES-FILHO *et al.*, 2017b), (GONÇALVES-FILHO *et al.*, 2017a). To overcome this problem we will use the graphs generated from experimental analyzes made by means of humidity sensors, to calibrate statistical models. In the second part of the work, a study will be done, through models that relate the hydraulic coefficient to the soil moisture. For this part the reference (GENUCHTEN, 1980) will be used. In (GENUCHTEN, 1980), analytical models describing the relationship between hydraulic coefficient, moisture and piezometric level were obtained. The theoretical models will be validated by comparing the theoretical curves and the experimental data acquired through sensors. As a complementary part of the work, numerical simulations will be done to analyze the behavior of the hydraulic coefficient, with the different models approached.

Keywords: Hydraulic coefficient, Granulometry, Soils, Moisture.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Usina serra do facão	30
Figura 3.2 – Ilustração da relação entre o tempo de transporte e o tamanho e arredondamento da partícula, que define o parâmetro de maturidade textural	30
Figura 3.3 – Teste laboratorial de coeficiente hidráulico K e nível piezométrico h , para solo saturado, a partir de um permeâmetro de carga decrescente	32
Figura 3.4 – Registro do pluviômetro A034 de Catalão-GO	35
Figura 3.5 – Malha quadrática de coleta de amostra em 4mX4m	36
Figura 3.6 – Profundidade da amostra de solo “A”	36
Figura 3.7 – Profundidade da amostra de solo “B”	37
Figura 3.8 – Profundidade da amostra de solo “C”	37
Figura 3.9 – Profundidade da amostra de solo “D”	38
Figura 3.10 – Balança de precisão	39
Figura 3.11 – Estufa de 105°C a 110°C estável	40
Figura 3.12 – Agitador mecânico	40
Figura 3.13 – Umidade higroscópica	41
Figura 3.14 – Quarteamento inicial	42
Figura 3.15 – Quarteamento final	42
Figura 3.16 – Lavagem do solo	43
Figura 4.1 – Gráfico do comportamento da difusividade D em relação ao teor de umidade θ	52
Figura 4.2 – Gráfico do comportamento da difusividade D em relação ao teor de umidade θ	53
Figura 4.3 – Gráfico do comportamento da difusividade D em relação ao teor de umidade θ do autor (GENUCHTEN, 1980)	53
Figura 4.4 – Gráfico do comportamento da condutividade hidráulica do solo $K(\theta)$ em relação ao teor de umidade θ	54
Figura 4.5 – Comportamento da função beta $f(\beta)$ para $n = 1,3567$ e $n = 3$	54
Figura 4.6 – Comportamento da função beta $f(\beta)$ para $n = 3$ e $n = 3,5$	55
Figura 4.7 – Comportamento da função beta $f(\beta)$ para $n = 3,8$ e $n = 4$	55

Figura 4.8 – Gráfico típico da umidade baseado na Eq. (4.3) o ponto P na curva está localizado no meio do caminho entre θ_r e θ_s	56
Figura 4.9 – Comportamento de capilaridade e molhabilidade para valores de umidade $w = 0,0003; 0,0005; 0,0007$ e $0,0009$	57
Figura 4.10 – Topologia proposta para a comunicação.	60
Figura 4.11 – Módulo no sub-solo.	61
Figura 4.12 – Circuito do módulo WTIM desenvolvido para os testes.	61
Figura 4.13 – Módulo WTIM.	62
Figura 4.14 – Caixa de armazenamento do sensor	63
Figura 4.15 – Sensor de umidade	64
Figura 4.16 –	64
Figura 4.17 –	65
Figura 4.18 –	65
Figura 5.1 – Análise granulométrica Ponto "A"	70
Figura 5.2 – Análise granulométrica Ponto "B"	70
Figura 5.3 – Análise granulométrica Ponto "C"	71
Figura 5.4 – Análise granulométrica Ponto "D"	71
Figura 5.5 – Cálculo da condutividade hidráulica pela equação (3.9) a partir da granulometria	72
Figura 5.6 – Cálculo da condutividade hidráulica pela equação (3.10) a partir da granulometria	72
Figura 5.7 – Cálculo da condutividade hidráulica pela equação (3.11) a partir da granulometria	72
Figura 5.8 – Cálculo da condutividade hidráulica pela equação (3.12) a partir da granulometria	73
Figura 5.9 – Cálculo da condutividade hidráulica pela equação (3.13) a partir da granulometria	73
Figura 5.10 – Cálculo da condutividade hidráulica pela equação (3.14) a partir da granulometria	74
Figura 5.11 – Cálculo da condutividade hidráulica pela equação (3.15) a partir da granulometria	74
Figura 5.12 – Cálculo da condutividade hidráulica pela equação (3.16) a partir da granulometria	75
Figura 5.13 – Cálculo da condutividade hidráulica pela equação (3.17) a partir da granulometria	75
Figura 5.14 – Cálculo da condutividade hidráulica pela equação (3.18) a partir da granulometria	76
Figura 5.15 – Comportamento da condutividade hidráulica K para diferentes valores de SF	77

Figura 5.16 – Condutividade hidráulica $K(cm/dia)$ aproximada	77
Figura 5.17 – Gráfico típico da umidade baseado na Eq. (4.10) a partir de dados experimentais e $\alpha = 0,005$, $m = 2,0$ e $n = 0,50$	78
Figura 5.18 – Potencial hidráulico $h(cm^3/cm^3)$	78
Figura 5.19 – Condutividade hidráulica K X Potencial hidráulico h	79
Figura 5.20 – Potencial hidráulico h X umidade θ (ou w)	79
Figura 5.21 – Condutividade hidráulica $K_{(cm/dia)}$ X carga hidráulica $\theta = \left(\frac{1}{1+(\alpha h)^n}\right)^m$	80
Figura 5.22 – Condutividade hidráulica X parâmetros m e n	80
Figura 5.23 – Variação de condutividade hidráulica K versus variação do teor de umidade θ	81

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Cálculo da umidade do solo estudado	60
Tabela 4.2 – Transmissão dos dados entre o NCAP e o WTIM.	62
Tabela 5.1 – Valores de umidade [$\theta(XX)$] coletados pelo sensor de 30 em 30 <i>min</i>	68
Tabela 5.2 – Leitura de dados das imagens 5.1, 5.2, 5.3 e 5.4	69
Tabela 5.3 – Cálculos de valores de “K”	69

Lista de Algoritmos

Algoritmo A.1	90
Algoritmo .2	92
Algoritmo .3	94
Algoritmo .4	95
Algoritmo .5	96
Algoritmo .6	99
Algoritmo .7	100
Algoritmo .8	101
Algoritmo .9	102
Algoritmo .10	102
Algoritmo .11	102
Algoritmo .12	103
Algoritmo .13	103
Algoritmo .14	104

SUMÁRIO

1	JUSTIFICATIVA	25
2	OBJETIVO	27
3	ANÁLISE NUMÉRICA DA CONDUTIVIDADE HIDÁRAULICA A PARTIR DE MÉTODOS ESTATÍSTICOS	29
3.1	INTRODUÇÃO	29
3.2	Procedimentos de coleta do material do estudo	35
3.3	Aparelhagem	38
3.3.1	Aparelhagem para a coleta de amostras	38
3.3.2	Aparelhagem Laboratorial	38
3.4	Análise Laboratorial	40
3.5	Métodos de cálculos de “ K_s ” a partir dos valores de d_{10} , d_{50} e d_{60}	43
3.6	Conclusão	45
4	ANÁLISE NUMÉRICA DA CONDUTIVIDADE HIDÁRAULICA VIA MÉTO- DOS ANALÍTICOS	47
4.1	INTRODUÇÃO	47
4.2	Equações baseadas no modelo de Mualem	49
4.3	Equações baseadas no modelo de Burdine	57
4.4	Procedimentos de coleta do material do estudo	59
4.4.1	Umidade do solo	59
4.5	Dados técnicos do sensor de umidade e circuito eletrônico (arduíno)	60
4.5.1	Arquitetura Proposta	60
4.6	Teste e Análise do Módulo Subterrâneo	62
4.6.1	Instalação do sensor de umidade	62
4.7	Conclusão	66
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	67
5.1	Resultados de K para valores amostrais da distribuição granulométrica do solo	67
5.1.1	Valores de condutividade hidráulica a partir das equações 2.10 até 2.19	68

5.2	Resultados de valores de K a partir de valores amostrais da umidade θ do solo	76
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	83
6.1	Trabalhos Futuros	83
	REFERÊNCIAS	85
APÊNDICE A	CÓDIGOS	89

Capítulo 1

JUSTIFICATIVA

A permeabilidade dos fluidos no solo é um parâmetro primordial para qualquer grande obra da engenharia, ter conhecimento de dados técnicos da base onde será construído e de seu comportamento em condições de ausência ou presença de valores de umidade ou saturação de água é de suma importância para a conclusão da obra com um fator de segurança elevado.

Análises de tais parâmetros em laboratório são onerosos e nada rápidos, portanto, analisar esses parâmetros de forma empírica se faz necessário, aumentando a velocidade de conversão dos dados, diminuindo custos e tempo.

Capítulo 2

OBJETIVO

Este trabalho pretende encontrar um modelo empírico para a obtenção de valores de condutividade hidráulica do solo situado na UFCat a partir de valores de granulometria e umidade do solo, comparar os resultados obtidos e observar se convergiram para valores próximos.

Capítulo 3

ANÁLISE NUMÉRICA DA CONDUTIVIDADE HIDÁRAULICA A PARTIR DE MÉTODOS ESTATÍSTICOS

3.1 INTRODUÇÃO

A relação entre o coeficiente hidráulico e fluxo em meios porosos tem elevado custo laboratorial e demanda muito tempo. Porém é de suma importância o estudo de tais fatores em projetos de engenharia que necessitem quantificar o movimento hidráulico subterrâneo, seja para fins de tensão-deformação de estruturas, estabilidade de taludes, contaminantes, barragens entre outros (DAS, 2007) (WANG; MA; GUAN, 2016) (TZIMOPOULOS; SAKILLARIOU-MAKRANTONAKI, 1996)

O aferimento da condutividade hidráulica em laboratório, consome tempo e recursos financeiros elevados, por este motivo procedimentos baseados em métodos indiretos tem sido desenvolvidos, veja (GENUCHTEN, 1980), (SALARASHAYERI; SIOSEMARDE, 2012).

A realização de estudos hídricos possibilita o conhecimento da velocidade com que a água se movimenta no solo, sendo aplicado para um melhor manejo e uso do solo, remediação e lixiviação de uma região. Apesar da aplicabilidade dos métodos para a determinação de K em laboratório, alguns fatores são considerados desvantajosos, como a sua grande variabilidade, retirada das amostras em grandes profundidades, alto custo e o tempo elevado de acordo com (MARQUES, 2004) e (VANES, 1999), dificultando a determinação de um valor representativo para uma área e até em horizontes ao longo do perfil do solo.

A figura 3.1 mostra a usina hidrelétrica serra do facão situada no município de Catalão - GO que demonstra uma grande obra da engenharia, taludes de terra e barragem de con-

creto. Por baixo da barragem há solo e no mesmo há percolação de água, mostrando assim a importância de saber a condutividade hidráulica.

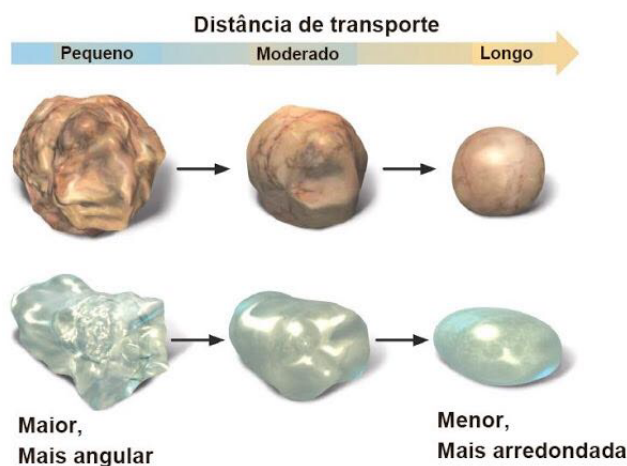
Figura 3.1 – Usina serra do facão



Fonte: (SEFAC, 2018)

Por outro lado um parâmetro importante a ser levado em consideração diz respeito à forma dos grãos SF (Fator de Forma) que varia de 6 à 8 de acordo com (DAS, 2007), formas essas afetadas pela distância em que cada grão foi transportado até ser sedimentado e, quão mais longa, mais arredondado a forma é, afetada também pelo intemperismo físico e químico sofridos pelos grãos (GROTZINGER, 2013), como mostrado na figura 3.2

Figura 3.2 – Ilustração da relação entre o tempo de transporte e o tamanho e arredondamento da partícula, que define o parâmetro de maturidade textural



Fonte: Adaptado (GROTZINGER, 2013)

A permeabilidade, representada pela velocidade do fluxo, é um dos parâmetros importantes na engenharia. Conforme a lei de Darcy o coeficiente hidráulico é responsável por controlar o movimento de água através dos vazios do solo, bem como, outros tipos de fluidos ou contaminantes. De acordo com (DAS, 2007) leva em conta o gradiente hidráulico, a velocidade de infiltração de líquidos no solo v ; sendo K o parâmetro que comporta-se como impedante de velocidade, quanto maior for K mais fácil o líquido se propaga no solo

e quão menor for K menos líquido é infiltrado no solo. Por sua vez o gradiente hidráulico i expressa a razão entre a variação da carga de pressão Δh e por distância percorrida L ; i tem sua expressão matemática dada por:

$$i = \frac{\Delta h}{L}, \quad (3.1)$$

onde Δh representa a diferença de carga de pressão definida pela variação de nível piezométrico em dois pontos A e B e L a distância percorrida pelo fluido. Matematicamente a lei de Darcy é expressa como,

$$v = ki. \quad (3.2)$$

Na Eq (3.2) v representa a velocidade do fluido; i o gradiente hidráulico e K a condutividade hidráulica.

Segundo (DAS, 2007), para efeitos de projetos em engenharia o coeficiente hidráulico é medido em laboratório, o experimento para a determinação do coeficiente hidráulico pode ser feito de duas formas diferentes, na primeira, o abastecimento controlado de água é fornecido de forma que a variação de carga entre a entrada e saída permanece constante. Através do volume de água coletada na saída, determina-se a vazão de fluido, o que permite o cálculo do gradiente hidráulico pela fórmula (3.1), substituindo i na equação (3.2) obtém-se o coeficiente hidráulico; no experimento com carga variável, determina-se a vazão através da variação instantânea do nível piezométrico, pela seguinte fórmula:

$$q = k \frac{h}{L} A = -a \frac{dh}{dt}, \quad (3.3)$$

onde q representa a vazão medida; a representa a área da seção transversal do piezômetro e A a área da seção transversal da amostra de solo; expressando o tempo como função do nível piezométrico na equação (3.3) obtemos:

$$dt = \frac{aL}{Ak} \left(-\frac{dh}{h} \right), \quad (3.4)$$

integrando a equação (3.4) com relação ao tempo obtemos,

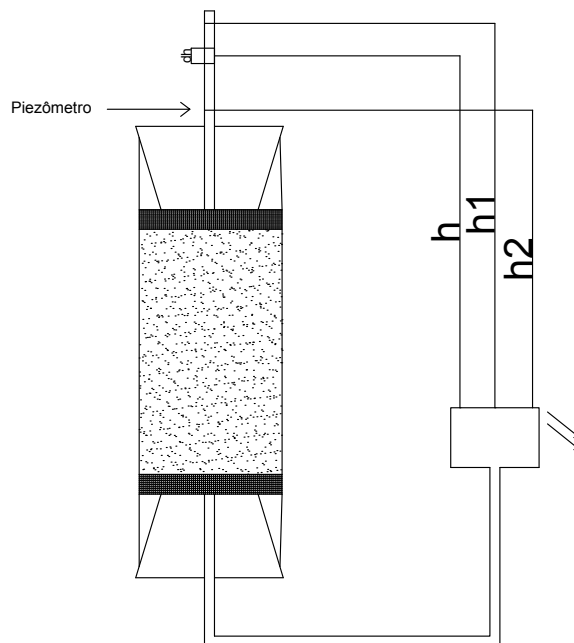
$$t = \frac{aL}{Ak} \ln \left(\frac{h_1}{h_2} \right), \quad (3.5)$$

isolando k na equação (3.5), obtemos,

$$k = 2,303 \frac{aL}{At} \log_{10} \left(\frac{h_1}{h_2} \right), \quad (3.6)$$

onde h_1 é a cota do recipiente auxiliar que conterà a água de descarte; h_2 é a cota da linha piezométrica, conforme a figura 3.3. O cálculo do coeficiente hidráulico também pode ser medido no campo veja (SALARASHAYERI; SIOSEMARDE, 2012).

Figura 3.3 – Teste laboratorial de coeficiente hidráulico K e nível piezométrico h , para solo saturado, a partir de um permeâmetro de carga decrescente



Fonte: Adaptado (DAS, 2007)

No presente trabalho foram feitos ensaios para quatro amostras de solo. Os solos foram coletados nas dependências da Universidade Federal de Catalão (UFCat). Os ensaios foram realizados de acordo com as normas da NBR-7181 (BRASIL, 2016b) que dispõe todos os métodos para análise granulométrica do solo sobre peneiramento, depois utilizou-se a NBR 5734 (BRASIL, 1988) e (BRASIL, 2010) que dispõem sobre quais peneiras devem ser utilizadas no ensaio de peneiramento, características técnicas, os métodos para verificação e a calibração de peneiras para ensaio, tecidos em telas de fios metálicos, afim de se obter os resultados mais assertivos neste teste, depois foi usado a NBR 6457 (BRASIL, 2016a) que dispõe sobre métodos de preparação de amostras de solos para ensaio, caracterização, tais como, quarteamento de amostras e volume em Kg a ser utilizado em cada amostra para que o ensaio seja representativo; enfim utilizou-se a NBR 6508 (BRASIL, 1984) que dispõe sobre metodologia a se aplicada nos grãos de solo que passam na peneira de $4,8\text{mm}$, determinando assim o método de ensaio a ser representativo.

De acordo com (SALARASHAYERI; SIOSEMARDE, 2012) a condutividade hidráulica mede a capacidade de movimentação de fluidos através de meios porosos. Para estimar os valores deste parâmetro, nos últimos anos a literatura indica o uso de métodos empíricos. Como principal justificativa para o uso de tais métodos pode-se citar o custo reduzido

quando comparado a métodos laboratoriais ou experimentais de campo. Por outro lado a grande vantagem em medições destes índices em laboratório é seu alto grau de precisão. Entretanto o custo de tais experimentos podem ser elevados, assim as pesquisas tem se concentrado em apresentar métodos alternativos em relação aos métodos diretos de medições. Entre os métodos alternativos, os que tem recebido maior atenção são os chamados métodos indiretos. De acordo com (CHAKRABORTY *et al.*, 2006), (ALYAMANI; SEN,), (MUALEM, 1976), (SHAO; ROBERT, 1998) e (GENUCHTEN; LEJI, 1992) os métodos de predição por distribuição granulométrica, entre os métodos indiretos são aqueles que tem recebido maior atenção. A partir da década de 70 além dos métodos clássicos, laboratoriais, técnicas baseadas em métodos diretos, cálculos baseados em fórmulas empíricas começaram a ser utilizada (TODD; MAYS, 2005). Seguindo a metodologia de análises empíricas aliada às experimentais, será proposto neste trabalho estudo de modelos teóricos em solos saturados, por exemplo, barragens de represas, barragens de rejeitos entre outros. Esta escolha, conforme (SALARASHAYERI; SIOSEMARDE, 2012) foi motivada pelas características do modelo, pois em solos não saturados, pressupõe a existência de dois fluidos imiscíveis, água e ar, isto é, o modelo que descreve o sistema deve levar em consideração o acoplamento entre saturação, massa específica e porosidade, o que necessita a solução para um conjunto de quatro equações diferenciais parciais mais as não linearidades, veja (REEVES; DUGUIUD, 1975). Para o modelo de solo saturado a solução das equações permitem uma análise detalhada do comportamento do índice de porosidade, inclusive suas dimensões. Entretanto os cálculos envolvidos nas soluções das equações descritas acima, são tarefas complexas de se determinar. Tem sido proposto na literatura, ao invés do cálculo das dimensões dos poros, uma aproximação das propriedades dos coeficientes hidráulicos por meio de análise da distribuição granulométrica do solo, veja (CIRPKA, 2003).

A predição de valores de condutividade hidráulica é feita a partir de modelos numéricos para simulação de movimento de fluidos nos vazios do solo com a massa transportada na zona insaturada (vazios) tem sido cada vez mais necessária nos últimos anos, pois análises laboratoriais para tais parâmetros tem alto custo, levando ainda muito tempo para ser mensurado (REEVES; DUGUIUD, 1975), (VAUCLIN; HAVERKAMP; VACHAUD, 1979) e (SEGOL, 1976).

Os métodos de estimação do coeficiente hidráulico para solos saturados baseados na distribuição de granulometria atraiu vários pesquisadores veja (BOADU, 2000), (MUALEM, 1976), (TYLER; WHEATCRAFT, 1989), (GENUCHTEN, 1980) e (GENUCHTEN; LEJI, 1992). Os autores em (FREEZE; CHERRY, 1979), reconhecem que a aproximação do coeficiente hidráulico para solos saturados por meio da distribuição granulométrica em meios porosos é uma técnica com bons resultados, podendo ser empregados em projetos de engenharia.

Em 1892, Hazen propôs que a condutividade hidráulica seria diretamente proporcional ao quadrado do diâmetro de partícula (d_{10}), em mm , no qual temos 10% das partículas

mais finas, ou seja, 10% da amostra que ficou retida nas peneiras de maior malha, conforme Eq. (3.7),

$$K_s = c(d_{10})^2, \quad (3.7)$$

onde K_s é expressado em cm/s , c é uma constante que varia entre 1,0 e 1,5 e d_{10} é o diâmetro de partícula de solo em que 10% dos passantes são finos (diâmetro em que 10% do solo amostrado passou nas ultimas peneiras, as de maior malha). A partir de tal relação vários autores sugeriram modificações e/ou adições de parâmetros (HAZEN; DURRETT, 1982).

Com o propósito de melhorar a acurácia do modelo, (SALARASHAYERI; SIOSEMARDE, 2012) efetuaram um estudo sobre a relação entre a condutividade hidráulica e a distribuição granulométrica, cujos resultados mostraram que as características hidráulicas do solo podem ser modeladas pelos valores obtidos em d_{10} , d_{50} e d_{60} , diâmetro de partícula de solo em que 10%, 50% e 60% dos passantes são finos, respectivamente.

Neste trabalho utiliza os modelos proposto por (SALARASHAYERI; SIOSEMARDE, 2012) para estimar a condutividade hidráulica com base nos resultados de análise granulométrica de um solo localizado na UFCat. A partir de amostras coletadas em campo, foram obtidas as curvas granulométricas de cada uma, de acordo com as figuras 5.1, 5.2, 5.3 e 5.4, cujos parâmetros d_{10} , d_{50} e d_{60} foram utilizados para a previsão da condutividade hidráulica.

Em monitoramento de barragens o parâmetro principal a ser analisado é o fluxo de água que percola pela estrutura. Tal fluxo em solos é um tema extremamente importante no projeto e construção de obras civis e/ou hidráulicas. De acordo com a lei de Darcy para se calcular o fluxo é necessário o conhecimento da condutividade hidráulica K e do gradiente hidráulico i , veja Eq.(3.2).

De acordo com (DAS, 2007), a velocidade piezométrica da Eq.(3.2) é baseada na área da seção transversal do solo, e é sempre menor que a velocidade de infiltração através dos vazios, a qual pode ser calculada conhecendo-se os seguintes índices físicos do solo: volume de vazios (V_v), volume de partículas sólidas (V_s), índice de vazios (e) e porosidade (n). Tais parâmetros se relacionam entre si de acordo com a Eq. (3.8) (DAS, 2007).

$$v_s = v \left[\frac{1 + \left(\frac{V_s}{V_v} \right)}{\frac{V_v}{V_s}} \right] = v \left(\frac{1 + e}{e} \right) = \frac{v}{n}, \quad (3.8)$$

a quantificação da permeabilidade da água ao solo refer-se, por exemplo, à necessidade de caracterizar o espaço poroso e identificar mudanças na estrutura do solo, oriúndas às práticas de manejo, estabelecendo ainda correlações com outras importantes propriedades do solo que são difíceis de serem determinadas, como por exemplo a condutividade hidráulica.

O solo pode ser entendido como um sistema constituído de três fases: sólida (partículas), água e ar, cujas proporções definem o seu comportamento físico e a reação a diferentes

estados de tensões (DAS, 2007). A água e o ar se localizam nos vazios do solo, os quais estão em contato direto e são capazes de percolar por esses espaços. ((DAS, 2007)).

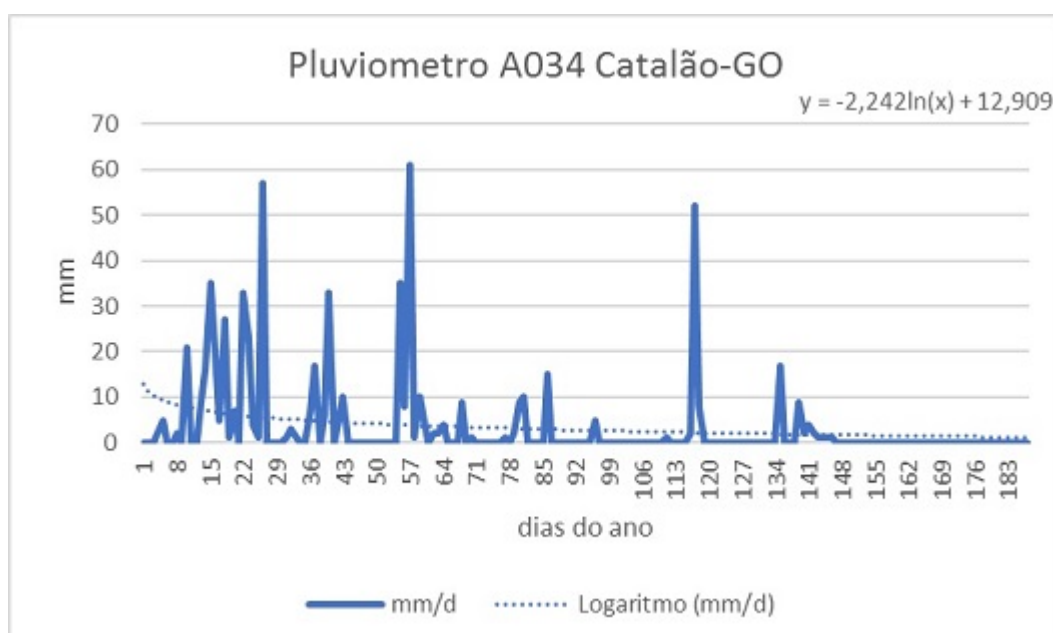
A compreensão sobre a forma como se dá o fluxo de água nos vazios do solo (meio poroso) é fundamental para a elaboração de projetos de engenharia, tais como: estruturas de contenção (barragens de terra), construções subterrâneas e obras hidráulicas, as quais estão sujeitas a forças de infiltração, necessitando, portanto, da definição das propriedades hidráulicas do solo ((DAS, 2007)).

3.2 Procedimentos de coleta do material do estudo

O solo usado para preparo das amostras foi coletado na camada superficial (30–60 *cm*) e demarcados como sendo Solo *A*, como mostrado na figura 3.6, Solo *B*, como mostrado na figura 3.7, Solo *C*, como mostrado na figura 3.8 e Solo *D*, como mostrado na figura 3.9, em uma área experimental da Universidade Federal de Catalão (UFCat) em quatro pontos distanciados de 4 metros um do outro em uma malha quadrática, demarcados com estacas brancas, como mostrado na figura 3.5.

O local das coletas, fica à 4 *m* da estação pluviométrica A034-Catalão-GO, inserida no interior da UFCat, os dados pluviométricos do ano de 2017 desde o seu início até a data do experimento está anotado na figura 3.4

Figura 3.4 – Registro do pluviômetro A034 de Catalão-GO



Fonte: Adaptado (INMET 2017)

Figura 3.5 – Malha quadrática de coleta de amostra em 4mX4m



Fonte: O Autor, 2017

Figura 3.6 – Profundidade da amostra de solo "A"



Fonte: O Autor, 2017

Figura 3.7 – Profundidade da amostra de solo “B”



Fonte: O Autor, 2017

Figura 3.8 – Profundidade da amostra de solo “C”



Fonte: O Autor, 2017

Figura 3.9 – Profundidade da amostra de solo “D”



Fonte: O Autor, 2017

3.3 Aparelhagem

3.3.1 Aparelhagem para a coleta de amostras

Enxada, trena, perfurador de solo, estacas de madeira, sacos plásticos, baldes e marcador para identificação.

3.3.2 Aparelhagem Laboratorial

Balança analítica que permite pesar nominalmente 200g com resolução de 0,01g com sensibilidade compatível, de acordo com a figura 3.10;

Estufa capaz de manter a temperatura estável entre 105°C e 110°C, de acordo com a figura 3.11; Recipientes adequados tais como: dessecadores que permitam armazenar a amostra sem a variação da umidade; Termômetro graduado 0,1°C; Relógio com indicação de segundos; Peneiras de 4,8mm, 3,35mm, 2mm, 600µm, 425µm, 250µm, 150µm, 75µm e tigela de fundo para coleta do passante na peneira de 75µ. Agitador mecânico de peneiras contendo dispositivo de fixação de até seis peneiras, tampa e fundo, de acordo com a figura 3.12;

Escovas com cerdas metálicas, pisseta com água, cadinho de porcelana, almofariz com pistilo e colher.

As peneiras granulométricas são essenciais para diversos experimentos laboratoriais,

desde um procedimento simples de separação de partículas ou grânulos, até a identificação do tamanho de partículas que compõem certo tipo de solo. A análise granulométrica é o estudo que permite identificar o tamanho e a distribuição dos grãos. As peneiras granulométricas possuem diferentes aberturas que são padronizadas internacionalmente. O número de abertura por polegada é chamado de malha e é determinado da maneira a seguir: Quanto maior a malha, maior o número de aberturas e mais fino deverá ser o grão, para passar por ela.

De forma prática e rápida, para análise de materiais grosseiros é indicado o uso de peneiras de malha grossa e materiais finos, é necessário o uso de peneiras de malha fina.

O usuário pode utilizá-las de maneira individual, através da agitação manual, ou então otimizar todo o processo com a utilização do equipamento para laboratório denominado agitador de peneiras, também chamado de mesa vibratória. Através de movimentos uniformes, os resultados obtidos são reproduzíveis, permitindo até que se padronize os procedimentos no ambiente de análises e pesquisa, o que não é possível via agitação realizada com a mão. Outra vantagem, dependendo do modelo e do fabricante, é o empilhamento das peneiras em um único equipamento, o que aumenta consideravelmente a capacidade de trabalho.

Vale ressaltar que existem diferentes formas e tamanhos de peneiras. As mais comuns são as que possuem formato redondo sob as medidas (diâmetro x altura): 8" x 2"; 5" x 2"; 3" x 2"; a peneira utilizada nesse trabalho é a demonstrada na figura 3.12.

Figura 3.10 – Balança de precisão



Fonte: O Autor, 2017

Figura 3.11 – Estufa de 105°C a 110°C estável



Fonte: O Autor, 2017

Figura 3.12 – Agitador mecânico



Fonte: O Autor, 2017

3.4 Análise Laboratorial

Os solos coletados foram identificados como *A*, *B*, *C* e *D*, após isso foram secos até a umidade higroscópica por aproximadamente oito horas, de acordo com a figura 3.13.

Figura 3.13 – Umidade higroscópica



Fonte: O Autor, 2017

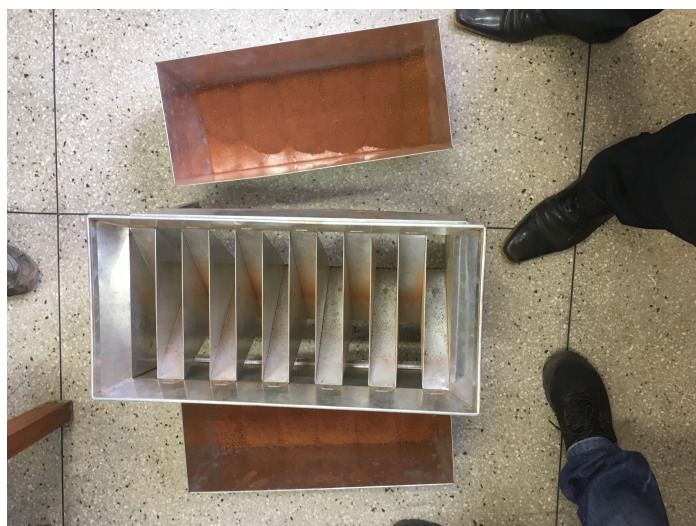
O solo então foi quarteado e reservou-se em média 1 kg de cada uma das amostras, de acordo com a figura 3.14 e figura 3.15. Após o quarteamento, passou-se cada solo na peneira de 4,8 mm e nada ficou retido na mesma, portanto, passou-se cada solo na peneira com malha de 2 mm, o retido na peneira foi então lavado e o passante foi para a peneira de 0,075 mm e também foi lavado até que a água saísse limpa em ambas as lavagens, de acordo com a figura 3.16. Com o auxílio da pipeta, espátula e água, colocou-se os solos lavados em cadinhos identificados, removeu-se o excesso de água dos cadinhos e verificou-se os pesos dos mesmos, deixando-os na estufa por 24 horas de acordo com a Figura 3.11.

Figura 3.14 – Quarteamento inicial



Fonte: O Autor, 2017

Figura 3.15 – Quarteamento final



Fonte: O Autor, 2017

Figura 3.16 – Lavagem do solo



Fonte: O Autor, 2017

No dia seguinte cada amostra de solo seco foi pesada novamente e passou por peneiramento vibratório com dez minutos de duração, na rotação máxima do aparelho, nas peneiras de 4mm, 3,35mm, 2mm, 600 μ m, 425 μ m, 250 μ m, 150 μ m, 75 μ m e fundo. Com os dados dos solos *A*, *B*, *C* e *D*. Gerou-se as curvas granulométricas a partir de um software de planilhas de dados.

Finalmente com os dados experimentais de granulometria foi possível obter os valores de d_{10} , d_{50} e d_{60} .

3.5 Métodos de cálculos de “ K_s ” a partir dos valores de d_{10} , d_{50} e d_{60}

Nesta seção os valores de d_{10} , d_{50} e d_{60} serão usados para fazer a modelagem estatística da condutividade hidráulica a partir das Eq's (3.9) até (3.18) definidas por (SALARASHAYERI; SIOSEMARDE, 2012) para a predição de K_s .

Pretende-se analisar o comportamento do solo coletado na UFCat, como demonstrado na seção de procedimentos de coleta do material do estudo 3.2, a partir das equações de (SALARASHAYERI; SIOSEMARDE, 2012) e verificar o comportamento da condutividade

hidráulica a partir de cada equação para os quatro dados de solo coletados e por fim fazer uma análise geral de todas as dez equações desse autor e verificar posteriormente no capítulo 4 valores de predição de K a partir de análises umidade θ de solo e verificar os valores das duas análises comparando assim quão próximas ficam, validando seus usos.

Os valores das equações abaixo serão simulados a partir do software de análise numérica; demonstrados e discutidos no capítulo 5 de resultados.

$$Ks = 8.91 + 61.08(d_{10}), \quad (3.9)$$

$$Ks = 16.88 + 10.60(d_{50}), \quad (3.10)$$

$$Ks = 16.55 + 8.32(d_{60}), \quad (3.11)$$

$$Ks = 16.16 + 121.50(d_{10})^2, \quad (3.12)$$

$$Ks = 20.90 + 6.52(d_{50})^2, \quad (3.13)$$

$$Ks = 20.79 + 3.84(d_{60})^2, \quad (3.14)$$

$$Ks = 10.14 + 114.67(d_{10}) - 20.93(d_{50}), \quad (3.15)$$

$$Ks = 9.80 + 116.39(d_{10}) - 15.92(d_{60}), \quad (3.16)$$

$$Ks = 16.68 - 2.85(d_{50}) + 10.38(d_{60}), \quad (3.17)$$

$$Ks = 10.06 + 118.54(d_{10}) - 12.50(d_{50}) - 7.32(d_{60}). \quad (3.18)$$

3.6 Conclusão

Nesse capítulo foi feito o estudo da análise da condutividade hidráulica a partir de parâmetros granulométricos. Essas estimativas foram baseadas em modelos de regressão multilinear, levando em consideração os valores de d_{10} , d_{50} e d_{60} . Os valores experimentais de d_{10} , d_{50} e d_{60} foram obtidos no laboratório de solos da UFCat. Obteve-se vários valores com uma certa variação. Nos próximos capítulos será feita a estimativa do coeficiente hidráulico por meio da umidade no solo. Entretanto os dados experimentais de umidade serão obtidos por meio de sensores instalados em profundidades apropriadas e serão comparados com a estimativa obtida no presente capítulo.

Capítulo 4

ANÁLISE NUMÉRICA DA CONDUTIVIDADE HIDÁRAULICA VIA MÉTODOS ANALÍTICOS

4.1 INTRODUÇÃO

O uso de modelos numéricos para simulação de movimento de fluidos nos vazios do solo e a massa transportada na zona insaturada tem sido cada vez mais necessária nos últimos anos, pois análises laboratoriais para tais parâmetros são onerosos e nada rápidos (REEVES; DUGUIUD, 1975), (VAUCLIN; HAVERKAMP; VACHAUD, 1979) e (SEGOL, 1976).

Neste capítulo pretende-se fazer uma análise numérico computacional dos diferentes modelos apresentados na literatura, que descrevem o comportamento da condutividade hidráulica a partir dos parâmetros do solo, a saber: carga hidráulica h , permeabilidade, heterogeneidade do solo, valores de umidade θ , o índice de vazios, porosidade e condutividade hidráulica. Parâmetros esses que requer alto custo laboratorial definidos em tempo elevado e onerosos. Muitos estudiosos tem, por essa razão, usado modelos numéricos para calcular a condutividade hidráulica de solos insaturados e mensurada a partir da curva de umidade a partir da Eq. (4.3).

Dentre os modelos usados na literatura, podemos citar o de (MILLINGTON; QUIRK, 1961); onde uma tentativa para descrever a condutividade hidráulica por meio do índice de porosidade é feita. Neste modelo o poro da amostra de solos é descrito por meio de volume, área, raio da área a partir de uma matriz chamada de matriz de porosidade. No caso contínuo a matriz de porosidade é substituída pela integral da função de área do poro. A partir de simulações numéricas o autor (MILLINGTON; QUIRK, 1961) estabeleceu vários perfis para a condutividade hidráulica. O autor (JACKSON, 1972) estuda modelos que relacionam o valor de condutividade hidráulica aos seguintes parâmetros: teor de umidade e carga hi-

dráulica. Para fazer a correlação entre estas variáveis, técnicas estatísticas de projeção foram usadas. Os autores (MILLINGTON; QUIRK, 1961) e (JACKSON, 1972) concluíram que as curvas ajustadas com os valores experimentais apresentaram erros de aproximação aceitáveis. Em (GREEN; COREY, 1971) foram utilizados métodos computacionais baseados, no modelo de interação, com modificações no método de Millington, entre poros para a predição da condutividade hidráulica de várias amostras de solos. O método de cálculo se baseou em ajuste de modelos através de dados experimentais mostrando-se adequado para a predição da condutividade hidráulica. Em (BRUCE, 1972), a relação entre curva de umidade, forças de capilaridade e matéria orgânica foram avaliadas para se determinar seus efeitos sobre a condutividade do solo. (JACKSON; REGINATO; BAVEL, 1965) fizeram uma comparação entre os modelos desenvolvidos por Millington, as características do fluxo de umidade, com resultados experimentais. Através de ajuste dos parâmetros o modelo apresentou bons resultados de aproximação.

(BROOKS; COREY, 1964) e (JEPPSON, 1974) usaram a expressão analítica de condutividade baseadas na teoria de (BURDINE, 1976), e obtiveram uma predição razoável em suas equações, apesar de haver descontinuidade na curva de umidade gerada devido a heterogeneidade dos perfis de solos representada pela curva teor de umidade versus condutividade hidráulica e das forças de capilaridade originadas pelo gradiente hidráulico. Os autores observaram que estas características podem afetar a convergência dos métodos numéricos utilizados nas simulações dos resultados teóricos. Eles basearam-se em métodos modificados de (MILLINGTON; QUIRK, 1961).

(MUALEM, 1976) em seu modelo para obter a condutividade hidráulica a partir do conhecimento da umidade, conduziu os estudos da condutividade hidráulica para uma fórmula com integral simples definida na Eq. (4.1) para solos insaturados.

De acordo com (GENUCHTEN, 1980), é possível obter uma fórmula do tipo $\Theta(h)$, ou seja, uma fórmula capaz de expressar a umidade de solos não saturados por meio da carga hidráulica atuante no solo. Esta fórmula empírica parte do pressuposto que o comportamento da carga hidráulica é conhecido. A partir desta curva, expressões analíticas para a condutividade hidráulica em função da carga hidráulica são obtidas. O comportamento de alguma destas relações serão discutidas em seções posteriores. Os experimentos conduzidos no presente trabalho se basearam no uso de sensores de umidade. Assim dados baseados apenas em umidade foram levados em consideração. Para que fosse possível usar as fórmulas dadas em (GENUCHTEN, 1980) algumas alterações tiveram que ser feitas. A principal delas diz respeito à relação umidade/carga hidráulica. Foi necessário, a partir das equações dadas em Genuchten, derivar uma expressão capaz de fornecer a carga hidráulica a partir de dados de umidade. Assim, os códigos computacionais gerados a partir das equações dadas em (GENUCHTEN, 1980), levaram em consideração a relação condutividade hidráulica/umidade. Esta metodologia permitiu que modelos baseados em diferentes parâmetros, como

granulometria e umidade, fornecendo a mesma condutividade hidráulica, fossem comparados com testes laboratoriais.

4.2 Equações baseadas no modelo de Mualem

Pesquisadores da área da engenharia geotécnica buscam modelos matemáticos para prever as propriedades hidráulicas dos solos em meios porosos, a partir de outros modelos mais simples e mensuráveis para diferentes tipos de zonas saturadas, insaturadas e de transição. Nesta seção faremos uma descrição mais detalhada das equações usadas na simulação da condutividade hidráulica.

A teoria proposta por (MUALEM, 1976), fornece um modelo matemático que expressa a condutividade hidráulica e os valores de umidade como função da carga hidráulica atuante na massa de solo. Para testes laboratoriais, onde é possível fazer medições e determinar valores de carga hidráulica baseados em padrões normativos, as equações deduzidas em (GENUCHTEN, 1980) podem ser usadas para montar rotinas computacionais e validar os modelos teóricos a partir dos dados coletados em campo. A equação (4.1) é a primeira, de um conjunto de equações dadas em (GENUCHTEN, 1980), que estabelece a condutividade hidráulica como função da umidade e da carga hidráulica que atua na massa de solo. Conforme pode ser visto, a equação (4.1) estabelece uma relação da raiz quadrada da umidade multiplicada pela integral da função $\frac{1}{h(x)}$ ao longo do intervalo $[0, \theta]$, onde h representa o valor da carga hidráulica no ponto x e θ os valores de umidade. Na equação (4.1) os valores da carga hidráulica não foram calculados em laboratório. Assim a equação (4.3) foi usada, em uma forma modificada, para que a equação (4.1) fosse usada. Na equação (4.3) é possível perceber a existência dos parâmetros m e n . De acordo com (GENUCHTEN, 1980), estes parâmetros são utilizados para ajustar o modelo de forma a fazer com que o modelo se adeque o mais próximo possível dos dados experimentais, que no presente caso foram os valores de umidade.

$$K_r = \theta_{(h)}^{1/2} \left[\int_0^{\theta_{(h)}} \frac{1}{h(x)} dx / \int_0^1 \frac{1}{h(x)} dx \right]^2, \quad (4.1)$$

conforme visto anteriormente, os parâmetros de umidade $\bar{\theta}$ foram normalizados de acordo com a seguinte equação

$$\bar{\theta} = \frac{\theta_{(h)} - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}, \quad (4.2)$$

em (4.2), θ_s e θ_r indicam valores saturados e residuais do teor de água do solo, respectivamente, valores saturados indicam o máximo de teor de umidade θ_s no solo e o residual é

o valor medido de umidade θ_r como mínimo, pois é o valor de umidade permanente na-quele solo devido às condições geológicas, meteorológicas, índices de vazios, porosidade e distribuição granulométrica pelos tamanhos e formas dos grãos.

A equação (4.3)

$$\theta = \left[\frac{1}{1 + (\alpha h)^n} \right]^m, \quad (4.3)$$

com $m = 1$, foi usada em muitos estudos para descrever dados de umidade, veja (AHUJA; SWARTZENDRUBER, 1972), (ENDELMAN *et al.*, 1974) e (HAVERKAMP *et al.*, 1977). Nes-tes trabalhos, os autores argumentam que o $m = 1$ foi escolhido por ser o valor que melhor se ajustou à curva de dados experimentais. Uma curva θ_h baseada equação (4.2) é mostrado na figura 4.8. É possível perceber que a figura possui um formato parecido com a letra S, e que a inclinação $d\theta/D_h$ torna-se zero quando se aproxima de valores saturados e residuais respec-tivamente. Estes dois regimes são justificados pelas forças de capilaridade, cuja magnitude pode ser expressa pela equação (4.11). As expressões, utilizadas neste trabalho, envolvendo a condutividade hidráulica para solos possui o inconveniente de apresentar como solução valores complexos. Essa característica é devido aos expoentes utilizados para o cálculo da condutividade hidráulica. Na implementação dos códigos computacionais foram tomados os cuidados necessários para evitar soluções complexas. Seguindo o raciocínio desenvolvido em (GENUCHTEN, 1980) a expressão para a condutividade hidráulica como função da umi-dade, pode ser escrita da seguinte forma

$$K_r(\theta) = \theta^{1/2} \left[\frac{f(\theta)}{f(1)} \right]^2, \quad (4.4)$$

onde $f(\cdot)$ que expressa valores de umidade a partir da seguinte integral

$$f(\theta) = \int_0^\theta \left[\frac{x^{1/m}}{1 - x^{1/m}} \right]^{1/n} dx. \quad (4.5)$$

Utilizando de manipulações algébricas a equação (4.5) pode ser descrita da seguinte forma

$$f(\theta) = m \int_0^{\theta^{1/m}} y^{m-1+\frac{1}{n}} (1 - y)^{-\frac{1}{n}} dy. \quad (4.6)$$

A equação (4.6) representa uma forma particular de função beta, para maiores deta-lhes veja (FALLS, 1973). De acordo com (GENUCHTEN, 1980) as integrais do tipo beta tem sido usada na literatura para descrever a dispersão do fluxo de fluidos em meios porosos. Entretanto as integrais do tipo possuem o inconveniente de não possuírem primitivas analí-ticas. Por isso os esforços na tentativa de se obter expressões mais simples para a integração.

No presente trabalho foi utilizada a técnica dos trapézios para a integração dessas equações, na expressão (4.6), se chamarmos $k = m - 1 + 1/n$ e considerando $k = 0$ a integral em (4.6) pode ser calculada analiticamente e sua expressão em função da umidade θ pode ser dada por

$$f(\theta) = 1 - (1 - \theta^{1/m})^m, \quad (4.7)$$

onde o parâmetro m é dado por $(m = 1 - \frac{1}{n})$ e n assume valores próximo de 2. Para esse caso temos que $f(1) = 1$ e assim a expressão pode ser simplificada assumindo a seguinte forma

$$K_r(\theta) = \theta^{\frac{1}{2}} [1 - (1 - \theta^{\frac{1}{m}})^m]^2. \quad (4.8)$$

Conforme pode ser visto na Eq.(4.8) fazendo as devidas suposições nos coeficientes da Eq. (4.5).

De acordo com o que foi dito anteriormente, quando da possibilidade de medições da carga hidráulica h , veja capítulo 3, a condutividade hidráulica pode ser descrita como função da carga hidráulica, veja Eq's (4.1) e (4.2). Nos experimentos realizados para a confecção do presente trabalho, foram feitos testes de umidade através de sensores de umidade, veja na seção de coleta de dados. Assim para utilizar os modelos de predição todas as fórmulas tiveram que ser adaptadas, tendo a variável umidade θ como variável independente. Tendo como base essas observações, a Eq. (4.9) foi simulada em duas etapas: na primeira etapa os valores de carga hidráulica foram simulados a partir dos dados de umidade, veja Eq. (4.10). A partir dos dados de carga hidráulica foi utilizada a Eq. (4.9) para plotar o gráfico de condutividade hidráulica/carga hidráulica. Será comentado com mais detalhes, na seção de resultados, os gráficos de condutividade hidráulica/umidade/carga hidráulica.

$$K_r(h) = \frac{\{1 - (\alpha h)^{n-1} [1 + (\alpha h)^n]^{-m}\}^2}{[1 + (\alpha h)^n]^{\frac{m}{2}}}, \quad (m = 1 - \frac{1}{n}). \quad (4.9)$$

$$h = \frac{1}{\alpha} \left[\left[\frac{\theta_s - \theta_r}{\theta - \theta_r} \right]^{1/m} - 1 \right]^{1/n}. \quad (4.10)$$

A equação (4.11), define a difusividade da amostra de solo. Como pode ser visto a difusividade é uma função da condutividade hidráulica e gradiente hidráulico. este parâmetro é responsável por medir as forças de capilaridade que surgem no solo devido a variação da

carga hidráulica. De (GENUCHTEN, 1980), e adotando as modificações feitas no presente trabalho, a difusividade hidráulica pode ser expressa como

$$D(\theta) = K(\theta) \left| \frac{dh}{d\theta} \right|, \quad (4.11)$$

resolvendo a Eq. (4.11) obtivemos a equação de difusividade de $D(\theta)$ como sendo:

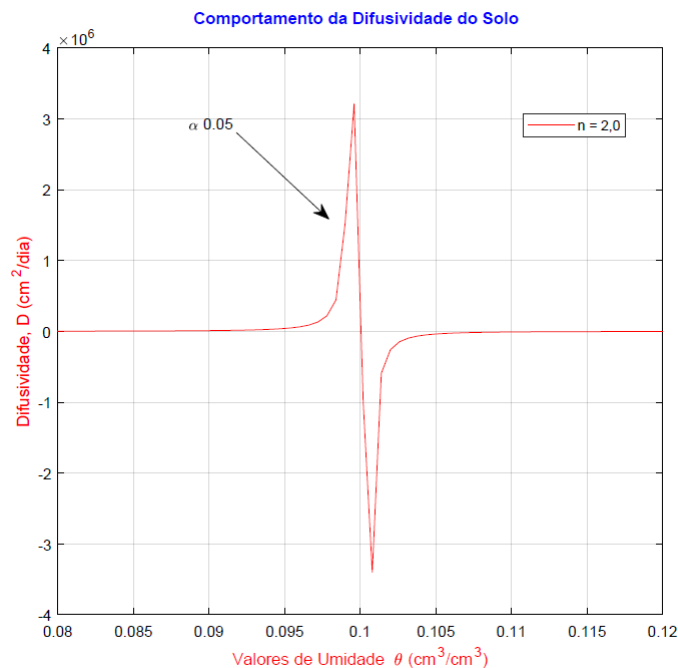
$$D(\theta) = \frac{(1-m)K_s}{\alpha m(\theta_s \theta_r)} \theta^{\frac{1}{2}-\frac{1}{m}} [(1-\theta^{\frac{1}{m}})^{-m} + (1-\theta^{\frac{1}{m}})^m - 2], \quad (4.12)$$

onde $K_s = K/K_r$ representa a condutividade hidráulica saturada.

Nos próximos parágrafos, faremos uma análise dos padrões gráficos das equações até agora analisadas.

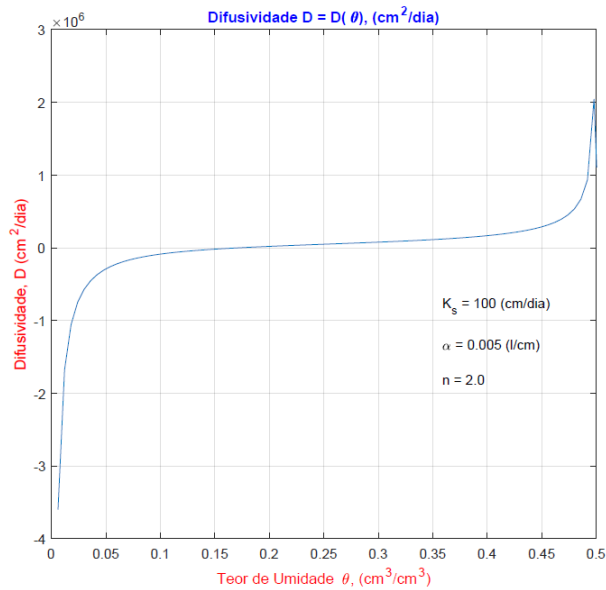
A figura 4.1 mostra o comportamento padrão da difusividade de fluido no solo com $\alpha = 0,05$. Como pode ser visto, o fluxo possui dois padrões bem estabelecidos, a saber, o fluxo saturado e o residual e entre esses dois perfis temos a difusividade do fluido

Figura 4.1 – Gráfico do comportamento da difusividade D em relação ao teor de umidade θ

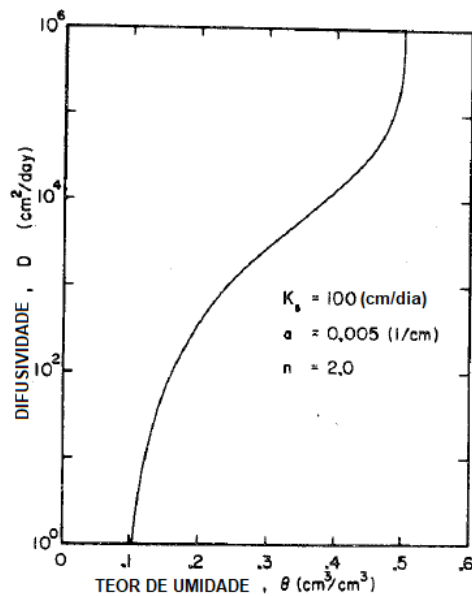


Fonte: O autor, 2018

A figura 4.2 está relacionando a capacidade de difusividade da água no solo em relação às umidades θ do autor (GENUCHTEN, 1980), Nota-se um comportamento similar a (GENUCHTEN, 1980), veja figura 17, onde os parâmetros utilizados foram os mesmos usados pelo autor em (GENUCHTEN, 1980), veja figura 4.3

Figura 4.2 – Gráfico do comportamento da difusividade D em relação ao teor de umidade θ 

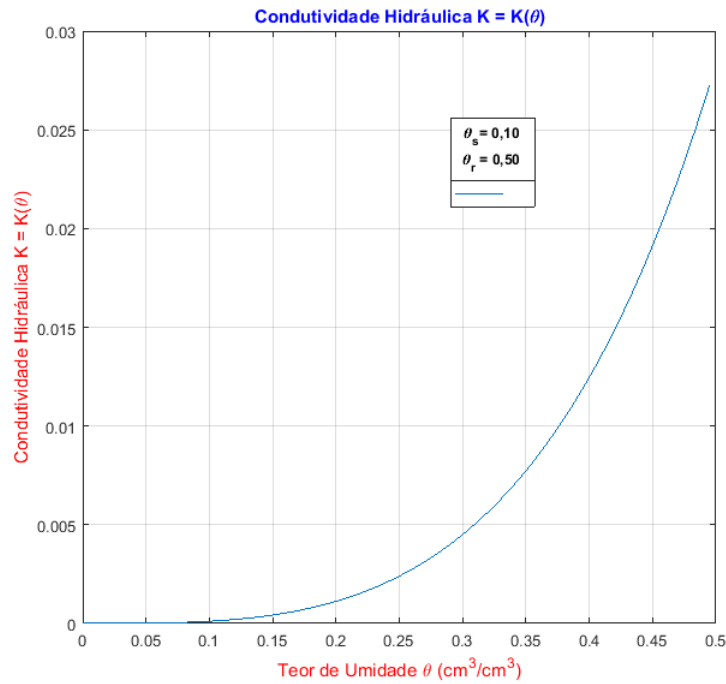
Fonte: O autor, 2018

Figura 4.3 – Gráfico do comportamento da difusividade D em relação ao teor de umidade θ do autor (GENUCHTEN, 1980)

Fonte: (GENUCHTEN, 1980), Adaptado

A figura 4.4 representa a variação da condutividade hidráulica como função da umidade, levando em consideração a equação (4.8). A escala de variação da condutividade hidráulica vai de $0,005$ (cm/dia) até $0,030$ (cm/dia) o que está dentro da faixa de valores simuladas em (GENUCHTEN, 1980).

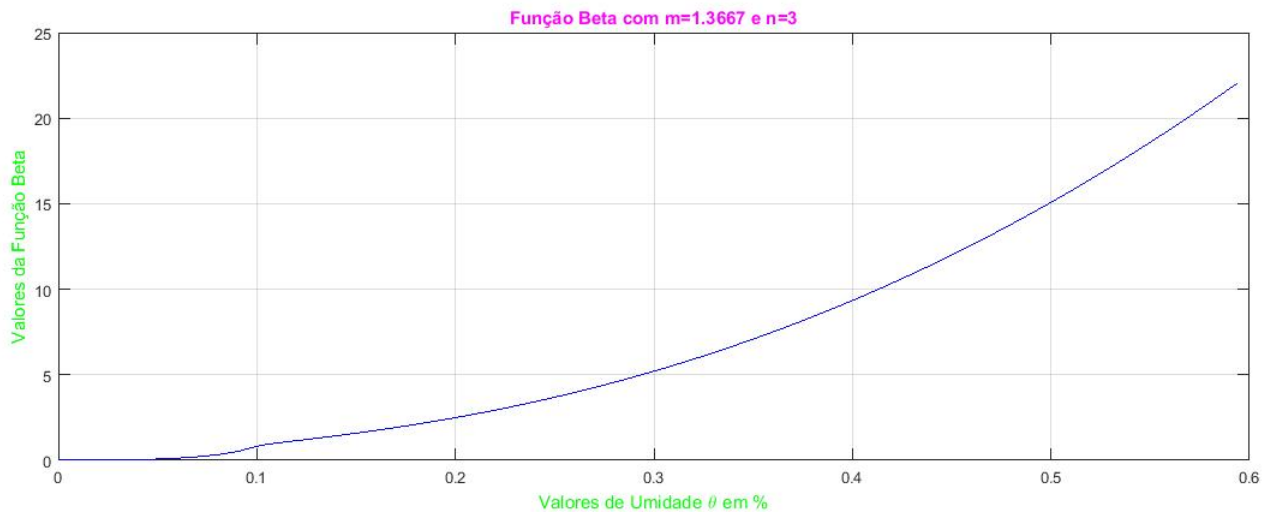
Figura 4.4 – Gráfico do comportamento da condutividade hidráulica do solo $K(\theta)$ em relação ao teor de umidade θ



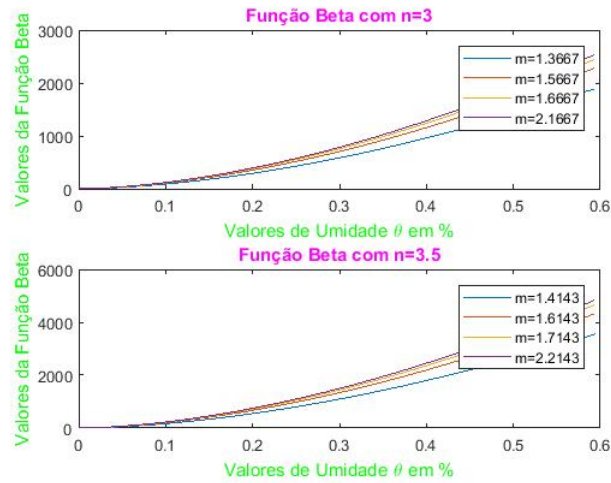
Fonte: O autor, 2018

As figuras 4.5-4.7, mostram o comportamento da função beta para diferentes valores de m e n . esta função apresenta o comportamento da condutividade hidráulica a partir de valores de umidade, conforme a Eq. (4.6). De acordo com esse gráfico pode-se ver que uma relação diretamente proporcional entre umidade e condutividade hidráulica.

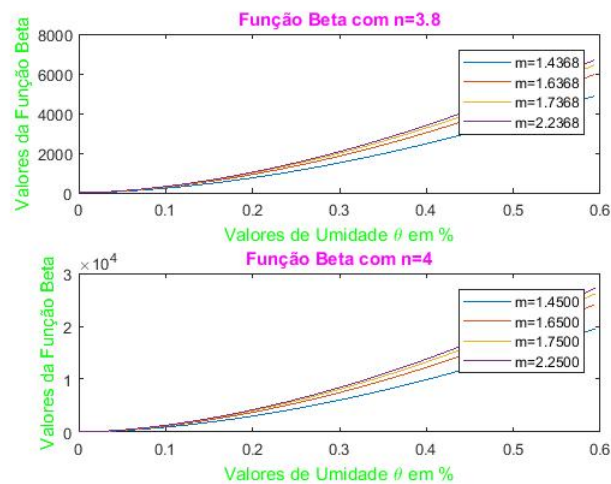
Figura 4.5 – Comportamento da função beta $f(\beta)$ para $n = 1,3567$ e $n = 3$



Fonte: O Autor, 2018

Figura 4.6 – Comportamento da função beta $f(\beta)$ para $n = 3$ e $n = 3,5$ 

Fonte: O Autor, 2018

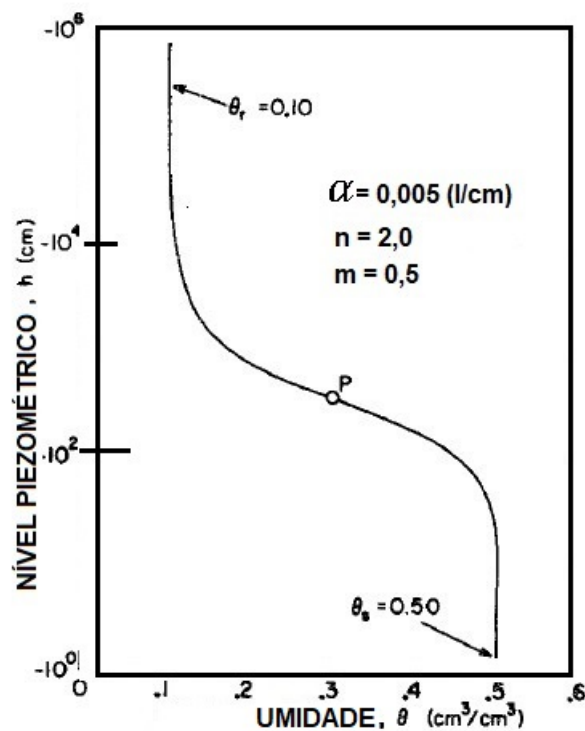
Figura 4.7 – Comportamento da função beta $f(\beta)$ para $n = 3,8$ e $n = 4$ 

Fonte: O Autor, 2018

O gráfico na figura 4.8 representa o comportamento típico da umidade como função da carga hidráulica com valores residuais e de saturação para a umidade, dadas respectivamente por θ_r e θ_s na figura 4.8, representa o fluxo de água em camada heterogêneas de solo, pois camadas rasas (superiores) de solo, por estarem expostas à radiação solar, são mais quentes e secas, logo, com teor de umidade menor; quando na presença de gradientes hidráulicos podemos ver pela figura, que a parte próxima a superfície possui uma variação pequena de umidade devido à radiação solar ser mais intensa na superfície do solo, depois o gradiente hidráulico aumenta a quantidade de fluido (água) aumentando o teor de umidade até que a mesma atinge seu ponto de saturação; na parte menos úmida, os teores de umidade variam de 10 à 13%. Observa-se também que na figura 4.8 a escala do eixo h está

negativa, pois o comportamento é maior para baixo, sendo o topo o nível zero, camada superior do solo. Quando o nível piezométrico h atinge valores suficientes para já ter resfriado o solo, os teores de umidade w ou θ começam a aumentar gradativamente, em um sistema de dispersão, e um comportamento em hipérbole é notado, quando os teores de umidade w ou θ atingem a saturação, não tendo portanto mais espaço umidecer-se, novamente apenas o nível piezométrico h aumenta, com os teores de umidade ficando estagnados em $w = 0,50$. O perfil descontínuo da figura 4.9 mostra o caráter heterogêneo do solo. Este perfil também explica a variabilidade de valores captados pelo sensor de umidade.

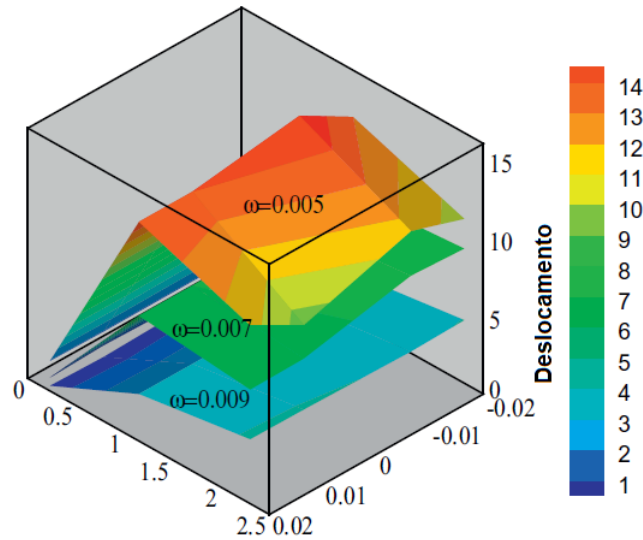
Figura 4.8 – Gráfico típico da umidade baseado na Eq. (4.3) o ponto P na curva está localizado no meio do caminho entre θ_r e θ_s



Fonte: (GENUCHTEN, 1980) Adaptado

A figura 4.9, tem por objetivo mostrar os efeitos da força de capilaridade cuja magnitude é dada pelo módulo do gradiente hidráulico; enquanto a figura 23 mostrou os efeitos do gradiente hidráulico, e portanto das forças de capilaridade na variação de umidade, a figura 24 mostra os efeitos das forças de capilaridade sobre os valores de umidade; observa-se na figura que a direção do gradiente hidráulico é positivo da direção vertical para baixo. Pode-se ver que a medida que as forças de capilaridade vão aumentando os teores de umidade vão de 0,5% à 0,9% de acordo com (AMARESH, 2013).

Figura 4.9 – Comportamento de capilaridade e molhabilidade para valores de umidade $w = 0,0003; 0,0005; 0,0007$ e $0,0009$



Fonte: (AMARESH, 2013) Adaptado

4.3 Equações baseadas no modelo de Burdine

Nesta seção faremos alguns comentários sobre as adaptações feitas na equação (4.1), para se adequarem ao modelo de Burdine, veja (GENUCHTEN, 1980). Conforme sugere (GENUCHTEN, 1980), a equação (4.1) é adaptada com um termo quadrático para assumir a forma dada na equação (4.13). Como pode ser visto, a equação em (4.13) é bastante similar à equação em (4.1). Enquanto na equação (4.1) o termo que representa a umidade contribui com um potência de ordem 0,5, no modelo de Burdine o termo referente à contribuição da umidade contribui com uma potência de ordem 2. Já o termo envolvendo a integral do gradiente hidráulico contribui com uma potência de ordem 2 na modelo de Mualem (equação (4.1)), e no modelo de Burdine a contribuição é da ordem de 1. De acordo com os resultados numéricos discutidos em (GENUCHTEN, 1980) o modelo de Burdine se ajusta melhor às curvas experimentais para a umidade em relação ao de MUALEM, carga hidráulica e condutividade hidráulica. O procedimento de ajuste, no caso do modelo Burdine, é feito similar ao utilizado para o ajuste no modelo de MUALEM, (GENUCHTEN, 1980). No presente trabalho foram feitos os ajustes de curvas levando em consideração o modelo de Mualem. Conforme será visto no próximo capítulo, as escalas para as curvas de, umidade, carga hidráulica, condutividade hidráulica e difusividade hidráulica, foram similar à aquelas apresentadas em (GENUCHTEN, 1980)

$$K_r(\theta) = \theta^2 \int_0^\theta \frac{1}{h^2(x)} dx / \int_0^1 \frac{1}{h^2(x)} dx. \quad (4.13)$$

O método de análise para o modelo de Burdine segue os mesmos passos que foram feitos para o modelo de Mualem. Segue da Eq. (4.13) que a condutividade hidráulica é dada como função dos valores de umidade θ e valores de carga hidráulica h , seguindo o mesmo raciocínio da seção anterior, através de modelos empíricos, é possível descrever a carga hidráulica como função da umidade, levando em consideração valores de umidade residual e saturada, conforme a Eq. (4.3). Representando as integrais apenas como funções de θ a condutividade hidráulica assume a forma dada na Eq. (4.14),

$$K_r(\theta) = \theta^2 \frac{f(\theta)}{f(1)}, \quad (4.14)$$

onde:

$$f(\theta) = \int_0^\theta \left[\frac{x^{\frac{1}{m}}}{1 - x^{\frac{1}{m}}} \right]^{\frac{2}{n}} dx, \quad (4.15)$$

Percebe-se da Eq. (4.15) que, para o modelo de Burdine a função beta também é utilizada. Entretanto observa-se que no modelo de Burdine os expoentes assume formas diferentes daquelas que aparecem no modelo de Mualem, veja (4.6)

$$f(\theta) = \int_0^{\theta^{\frac{1}{m}}} y^{m-1+\frac{2}{n}} (1-y)^{\frac{-2}{n}} dy, \quad (4.16)$$

O mesmo comentário, sobre questões de integração numérica para o modelo de Mualem valem também para o de Burdine. As integrais dadas em Eq. (4.14) e Eq. (4.15) geralmente não possuem integração analítica, sendo seus valores determinados apenas através de métodos numéricos, no caso do presente trabalho o método do trapézio foi usado. Entretanto para casos de expoentes específicos as integrais dadas em (4.14) e (4.15) possuem integração analítica, veja equação (4.16) e (4.17).

$$f(\theta) = 1 - (1 - \theta^{\frac{1}{m}})^m. \quad (4.17)$$

Para valores específicos de m e n , a condutividade hidráulica assume a forma simplificada dada na Eq. (4.18).

$$K_r(\theta) = \theta^2 [1 - (1 - \theta^{\frac{1}{m}})^m], (m = 1 - \frac{2}{n}), (0 < m < 1; n > 2), \quad (4.18)$$

Utilizando a Eq. (4.3) a condutividade hidráulica pode ser escrita como função da carga hidráulica, conforme a Eq. (4.19).

$$K_r(h) = \frac{1 - (\alpha h)^{n-2} [1 + (\alpha h)^n]^{-m}}{[1 + (\alpha h)^n]^{2m}}, \quad (4.19)$$

Para a difusividade hidráulica, deve-se levar em consideração a fórmula da condutividade hidráulica de acordo com o modelo de Burdine juntamente com a expressão da capilaridade que é dada como gradiente da carga hidráulica, veja Eq. (4.11). No contexto do modelo de Burdine a expressão da difusividade hidráulica é dada na Eq. (4.20). Em termos de valores de umidade, a difusividade hidráulica é expressa na Eq. (4.20)

$$D(\theta) = \frac{(1-m)K_s}{2\alpha m(\theta_s - \theta_r)} \theta^{\frac{(8-\frac{1}{m})}{2}} \left[\left(1 - \theta^{\frac{1}{m}}\right)^{\frac{-(m+1)}{2}} - \left(1 - \theta^{\frac{1}{m}}\right)^{\frac{-(m-1)}{2}} \right]. \quad (4.20)$$

Os códigos empíricos dessa dissertação foram implementados a partir das equações demonstradas no decorrer dos capítulos em linha de programação.

A partir do código computacional, utilizou-se software análise numérica para assim obter resultados esperados a partir dos pontos amostrados, gerando assim o gráficos que serão por fim analisados para a tomada de decisão.

Os códigos utilizados nesse experimento estão disponíveis no apêndice A deste trabalho, sendo portanto, possíveis de se implementar.

4.4 Procedimentos de coleta do material do estudo

As coletas, tanto para análises via granulometria, quanto para análises via umidade foram realizadas dentro do campus 1 da UFCat nas proximidades da estação pluviométrica instalada dentro do mesmo.

4.4.1 Umidade do solo

Obter valores empíricos de condutividade hidráulica K , foram necessários alguns parâmetros como a granulometria mostrada no capítulo 3 a partir de parâmetros d_{10} , d_{50} e d_{60} , fazer análises laboratoriais ou então a partir dos valores de θ umidade do solo em questão, afin de reduzir custos e minimizar o tempo dos resultados de conhecimento da condutividade hidráulica K , (MUALEM, 1976) e (BURDINE, 1976) definiram expressões matemáticas para a obtenção de valores de condutividade hidráulica K a partir de valores de θ . Para tanto, foi medida a umidade θ presente no solo no momento da coleta da amostra que foi calculada e demonstrada na tabela 5.1 e via sensor de umidade que registrou valores durante 4 dias em intervalos de 30 em 30 *min*.

Tabela 4.1 – Cálculo da umidade do solo estudado

PONTOS	Massa dos Recipientes (g)	Massa dos Solos Úmidos (g)	Massa dos Solos Secos + Recipiente (g)	Massa dos Solos Secos (g)	Umidade	Umidade (%)
1	17,0	30	43,9	26,9	0,12	12%
2	17,4	30	44,3	26,9	0,12	12%
3	17,0	30	43,9	26,9	0,12	12%
4	17,0	30	44,0	27,0	0,11	11%

O autor 2017

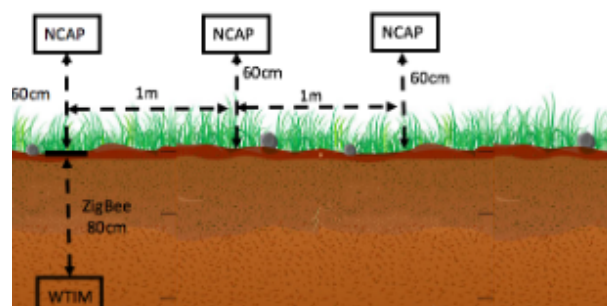
4.5 Dados técnicos do sensor de umidade e circuito eletrônico (arduíno)

Nesta sessão apresenta a arquitetura proposta para a instalação dos sensores é apresentada as etapas de desenvolvimento e as ferramentas utilizadas para a realização dos testes.

4.5.1 Arquitetura Proposta

A topologia proposta neste trabalho é apresentado na Figura 4.10, que tem como objetivo determinar a distância máxima que os módulos são capazes de estabelecer uma eficiente e confiável comunicação subterrânea. A arquitetura para a análise é composta por 2 módulos, um módulo subterrâneo e outro na superfície.

Figura 4.10 – Topologia proposta para a comunicação.



Fonte: O Autor, 2018

Na Figura 4.11 apresenta-se o módulo no sub-solo para a realização dos testes de comunicação.

Na Figura 4.12 é apresentado o circuito com os componentes do módulo WTIM, sendo: o módulo de comunicação sem fio (XBee Pro S2), entrada para o conversor A/D (Analógico/-

Figura 4.13 – Módulo WTIM.



Fonte: O Autor, 2018

A comunicação, a configuração e os frames enviados de um módulo para o outro é realizada por meio do *software XCTU*, criado pela empresa *Digi International*. O *software* possibilita a configuração da característica do transmissor sem fio, podendo ser: Coordenador, Roteador ou *End-Device*. Para este trabalho, os módulos foram definidos da seguinte forma, o módulo da superfície denominado de NCAP foi definido como Coordenador e o WTIM, como *End-Device*.

4.6 Teste e Análise do Módulo Subterrâneo

Neste trabalho foram realizados testes de comunicação entre os módulos NCAP (superfície do solo) e o WTIM (subterrâneo) baseado na topologia da Figura 4.13. Uma caixa de metal foi desenvolvida para acoplar o módulo WTIM, com uma saída para a antena e uma bateria de 12V, 9A. Os testes foram realizados em diferentes pontos de acordo com o apresentado na Figura 4.10. Na Tabela 4.2 apresenta-se a média dos bytes transmitidos com sucesso, as perdas e a quantidade recebida entre o NCAP e o WTIM.

Tabela 4.2 – Transmissão dos dados entre o NCAP e o WTIM.

	1 Metro	2 Metro
Bytes Enviados	1000	1000
Bytes Recebidos	952	798
Bytes Perdidos	48	202
Média (Recebidos)	95,2%	79,8%
Média (Perdidos)	4,8%	20,2%

Fonte: O Autor, 2018

4.6.1 Instalação do sensor de umidade

O procedimento de coleta de valores de umidade saturada θ_s e residual θ_r , foi o de coleta de dados obtidos pela instalação de um sensor à 40cm de profundidade no mesmo

local da coleta de solo já demonstrada no capítulo 3, esse sensor captou valores de umidade θ constantemente durante 4 dias em intervalos de 30 em 30 *min* e foi armazenando em sua memória interna, após retirar o sensor foi possível obter os parâmetros necessários para a obtenção da curva de umidade a partir da Eq. (4.10)

A figura 4.14 demonstra a caixa de armazenamento do sensor, essa caixa deve ser reforçada para suportar ações do tempo como sol, chuva, calor e frio, é nela que o sensor fica protegido para realizar sua coleta de dados de forma contínua sem interferências.

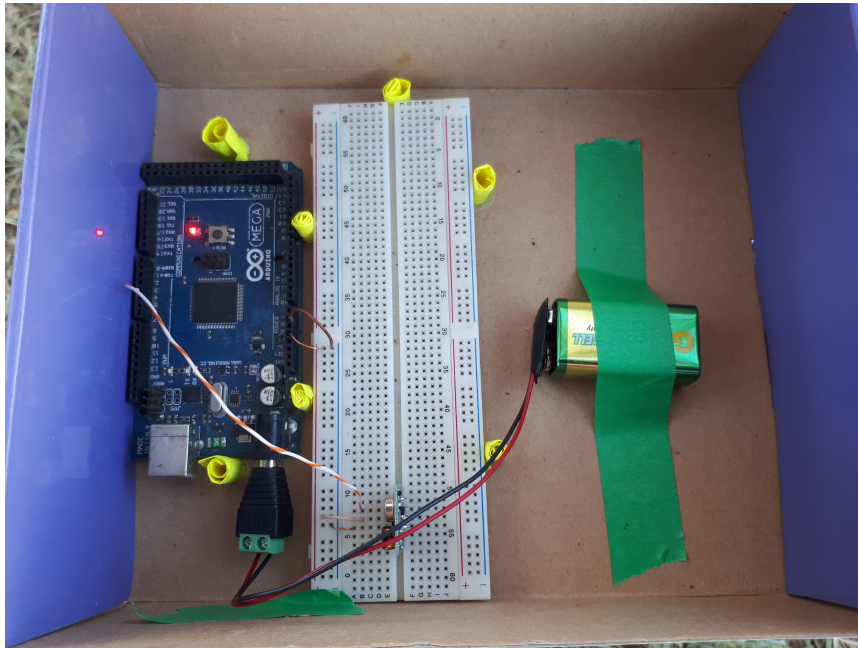
Figura 4.14 – Caixa de armazenamento do sensor



Fonte: O Autor, 2018

As figuras 4.15 e 4.16 mostram o sensor de umidade já conectado à bateria e pronto para ser instalado, colocado dentro da caixa de armazenamento e levado ao seu respectivo local de coleta de dados de umidade θ

Figura 4.15 – Sensor de umidade



Fonte: O Autor, 2018

No mesmo local da coleta de amostras de solo na UFCat para a realização de análises granulométricas como já visto no capítulo 3, foi feito um furo de 40cm para que o sensor ficasse estacionado por 4 dias, registrando valores de umidade a cada 30min de forma constante, veja figuras 4.17 e 4.18

Figura 4.16



Fonte: O Autor, 2018

Figura 4.17



Fonte: O Autor, 2018

Figura 4.18



Fonte: O Autor, 2018

Os dados coletados pelo sensor foram armazenados em banco de dados e utilizados nos cálculos de predição de condutividade hidráulica de solo a partir de valores de umidade θ , como visto nas seções anteriores desse capítulo.

4.7 Conclusão

Nesse capítulo foi feito o estudo da análise da condutividade hidráulica a partir de parâmetros θ de umidade. Para a condutividade hidráulica obteve-se valor de aproximadamente $19m/dia$. Esse valor será comparado com os dados empíricos obtidos via modelos estatísticos baseados nos parâmetros d_{10} , d_{50} e d_{60} de granulometria.

Capítulo 5

RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Resultados de K para valores amostrais da distribuição granulométrica do solo

Os solos amostrados A , B , C e D , após a análise laboratorial descrita acima, retornou valores trabalhados em planilhas eletrônicas, cujo os gráficos foram gerados a partir da abertura das peneiras, em micrometros μm , e porcentagem de passantes acumulado. Os gráficos de dispersão foram gerados na direção x e y em que x representa a granulometria e y a porcentagem de grãos que passaram em cada peneira. O diâmetro da peneira que passou apenas 10% foi denotada por d_{10} , a que passou 50% foi denotada por d_{50} e a que passou 60% foi denotada por d_{60} , como observado nas figuras 5.1 ... 5.4.

O solo na natureza, encontrado sob a forma de camadas de material heterogêneo, apresenta variações de tamanho nas partículas que o compõe. O reconhecimento dessas partículas nos auxiliou na definição das aplicações possíveis do solo como material de construção. A tabela 5.2, obtida a partir das leituras das figuras 5.1, 5.2, 5.3 e 5.4, que representam a distribuição granulométrica das quatro amostras, sendo que todas são provenientes do mesmo tipo de solo. A análise granulométrica é fruto do processo de separação das partículas de solo por tamanho. A análise é dita gravimétrica porque os percentuais retidos ou passados nos agrupamentos de diâmetros das peneiras é a relação entre os pesos de cada grupo e o peso total da amostra. Com os gráficos gerados, anotou-se os valores respectivos de d_{10} , d_{50} e d_{60} onde, d_{10} , é o tamanho dos grãos em que 10% são passantes em partículas de solo, d_{50} = diâmetro pelo qual passam 50% das partículas do solo, e d_{60} diâmetro pelo qual passam 60% das partículas de solo.

Os dados analisados foram trabalhados em planilhas eletrônicas e em linhas programáveis de software de análise numérica, gerou-se gráficos sobre a análise granulométrica em cada ponto amostrado para assim conhecer a condutividade hidráulica saturada K_s , média das amostras a partir da análise de d_{10} , d_{50} e d_{60} analisados, e assim pela leitura dos

gráficos, foi anotado os respectivos valores na tabela 5.2. Na tabela 5.3 temos as resoluções das diferentes equações para obter valores de K_s , já na tabela 5.1 temos os valores de umidade anotados pelo sensor instalado no solo da UFCat automaticamente em intervalos de 30 em 30 minutos.

Tabela 5.1 – Valores de umidade [$\theta(XX)$] coletados pelo sensor de 30 em 30 min

Valores de umidade [$\theta(XX)$] coletados pelo sensor de 30 em 30 min											
$\theta(1)$	42	$\theta(19)$	72	$\theta(37)$	70	$\theta(55)$	68	$\theta(73)$	67	$\theta(91)$	67
$\theta(2)$	58	$\theta(20)$	72	$\theta(38)$	70	$\theta(56)$	68	$\theta(74)$	67	$\theta(92)$	67
$\theta(3)$	58	$\theta(21)$	72	$\theta(39)$	70	$\theta(57)$	68	$\theta(75)$	67	$\theta(93)$	67
$\theta(4)$	58	$\theta(22)$	72	$\theta(40)$	70	$\theta(58)$	68	$\theta(76)$	67	$\theta(94)$	67
$\theta(5)$	58	$\theta(23)$	72	$\theta(41)$	66	$\theta(59)$	68	$\theta(77)$	67	$\theta(95)$	67
$\theta(6)$	58	$\theta(24)$	71	$\theta(42)$	65	$\theta(60)$	68	$\theta(78)$	67	$\theta(96)$	67
$\theta(7)$	69	$\theta(25)$	71	$\theta(43)$	67	$\theta(61)$	68	$\theta(79)$	67	$\theta(97)$	67
$\theta(8)$	74	$\theta(26)$	71	$\theta(44)$	67	$\theta(62)$	68	$\theta(80)$	67	$\theta(98)$	67
$\theta(9)$	74	$\theta(27)$	71	$\theta(45)$	65	$\theta(63)$	68	$\theta(81)$	67	$\theta(99)$	67
$\theta(10)$	74	$\theta(28)$	71	$\theta(46)$	67	$\theta(64)$	68	$\theta(82)$	67	$\theta(100)$	67
$\theta(11)$	73	$\theta(29)$	71	$\theta(47)$	66	$\theta(65)$	68	$\theta(83)$	67		
$\theta(12)$	73	$\theta(30)$	71	$\theta(48)$	67	$\theta(66)$	68	$\theta(84)$	67		
$\theta(13)$	73	$\theta(31)$	71	$\theta(49)$	67	$\theta(67)$	68	$\theta(85)$	67		
$\theta(14)$	73	$\theta(32)$	71	$\theta(50)$	67	$\theta(68)$	68	$\theta(86)$	67		
$\theta(15)$	73	$\theta(33)$	70	$\theta(51)$	67	$\theta(69)$	68	$\theta(87)$	67		
$\theta(16)$	73	$\theta(34)$	70	$\theta(52)$	68	$\theta(70)$	68	$\theta(88)$	67		
$\theta(17)$	72	$\theta(35)$	70	$\theta(53)$	68	$\theta(71)$	68	$\theta(89)$	67		
$\theta(18)$	72	$\theta(36)$	70	$\theta(54)$	68	$\theta(72)$	67	$\theta(90)$	67		

O autor, 2018

As equações foram resolvidas de acordo com os modelos (3.9) até (3.18) e trabalhados no software de análise numérica, utilizando valores da tabela 5.2, resultou-se em K_s médio, máximo e mínimo a partir da definição de (SALARASHAYERI; SIOSEMARDE, 2012).

5.1.1 Valores de condutividade hidráulica a partir das equações 2.10 até 2.19

Os valores de d_{10} , d_{50} e d_{60} , foram extraídos dos gráficos representados nas figuras 5.1, 5.2, 5.3 e 5.4 e submetidos à várias equações em que suas variáveis principais eram d_{10} ,

Tabela 5.2 – Leitura de dados das imagens 5.1, 5.2, 5.3 e 5.4

	d_{10}	d_{50}	d_{60}
Ponto A	0,075	0,204	0,249
Ponto B	0,079	0,204	0,250
Ponto C	0,075	0,190	0,250
Ponto D	0,081	0,203	0,250
Média	0,078	0,200	0,250
Máximo	0,081	0,204	0,250
Mínimo	0,075	0,190	0,249
Desv. Padrão	0,00260	0,00593	0,00043

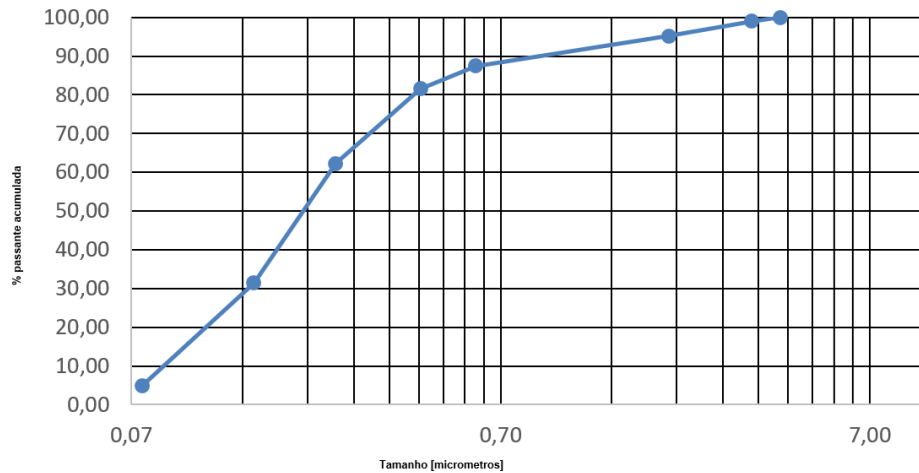
O autor, 2017

Tabela 5.3 – Cálculos de valores de “K”

Equação	K_s (Médio)	K_s (máximo)	K_s (Mínimo)
3.9	13,644	13,857	13,491
3.10	19,003	19,042	18,894
3.11	18,628	18,630	18,622
3.12	16,890	16,957	16,843
3.13	21,161	21,171	21,135
3.14	21,030	21,030	21,028
3.15	14,836	15,159	14,764
3.16	14,844	15,248	14,565
3.17	18,702	18,694	18,723
3.18	14,916	15,282	14,753

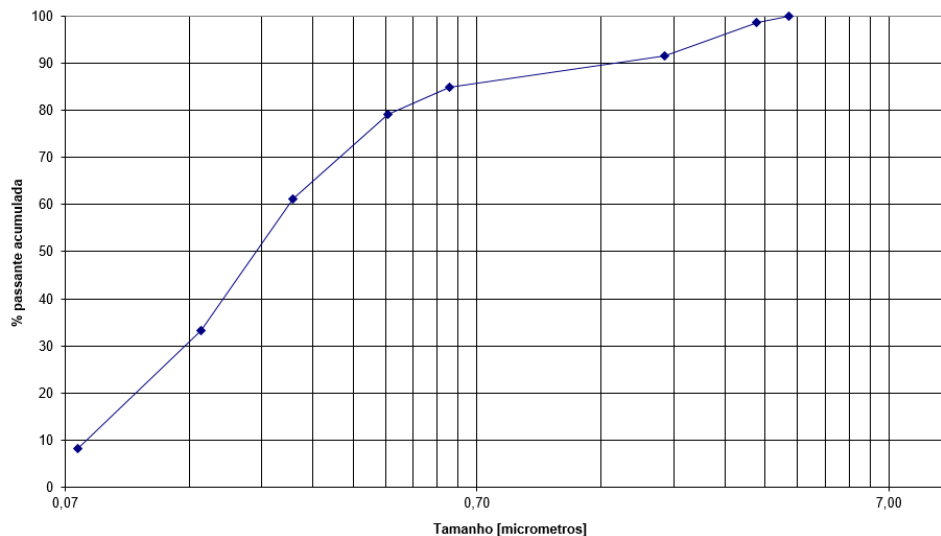
O autor (2017)

Figura 5.1 – Análise granulométrica Ponto "A"



Fonte: O Autor, 2017

Figura 5.2 – Análise granulométrica Ponto "B"



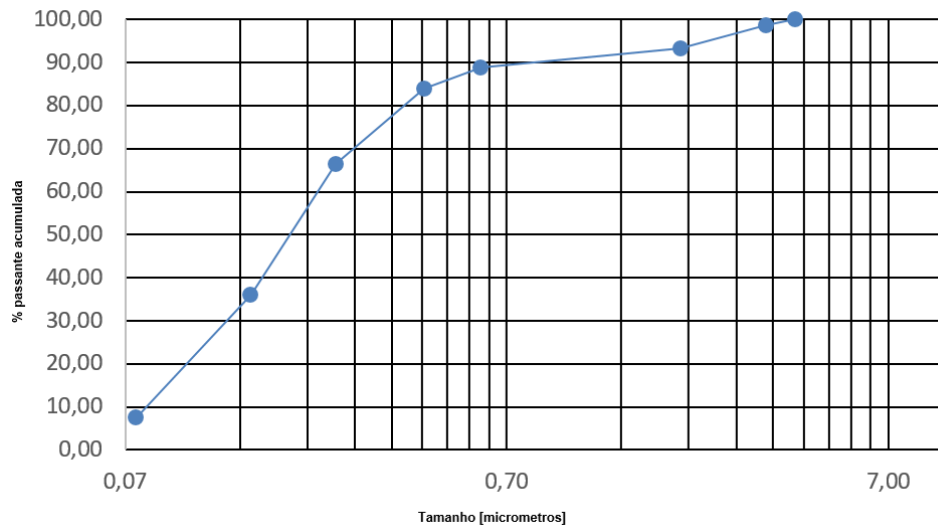
Fonte: O Autor, 2017

d_{50} e d_{60} , usou-se o software de análise numérica para implementar os códigos gerando os gráficos 5.5, 5.6, 5.7, 5.8, 5.9, 5.10, 5.11, 5.12, 5.13 e 5.14

A figura 5.5 gerada pelo software de análise numérica retorna valores de condutividade hidráulica para cada um dos quatro pontos amostrados, fez-se a leitura das figuras 5.1, 5.2, 5.3 e 5.4 nos gráficos de granulometria para estimar os valores de d_{10} , valor esse sendo o único parâmetro que varia na Eq. (3.9). Nota-se que, para os quatro pontos o valor da condutividade hidráulica se manteve na casa do $14m/d$ variando de $14,33m/d$ até $14,90m/d$

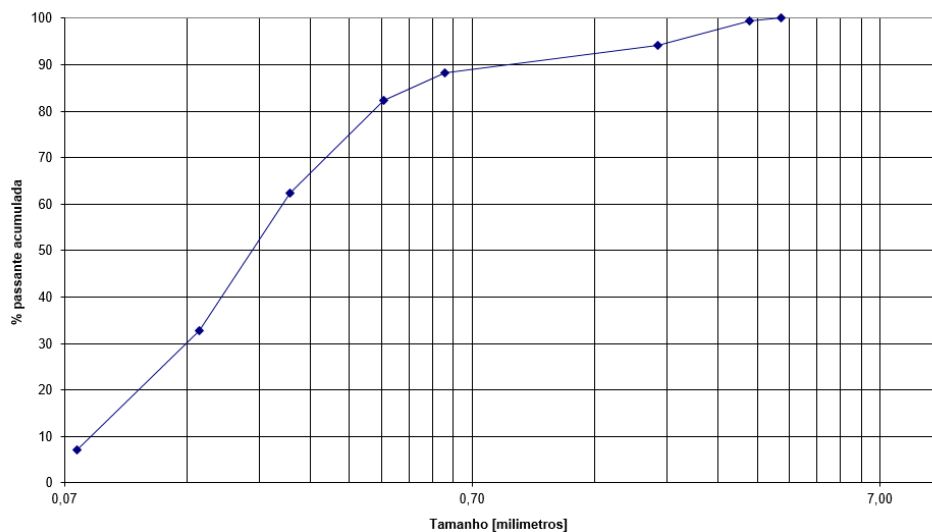
A figura 5.6 gerada pelo software de análise numérica retorna valores de condutividade hidráulica para cada um dos quatro pontos amostrados, fez-se a leitura das figuras 5.1,

Figura 5.3 – Análise granulométrica Ponto "C"



Fonte: O Autor, 2017

Figura 5.4 – Análise granulométrica Ponto "D"

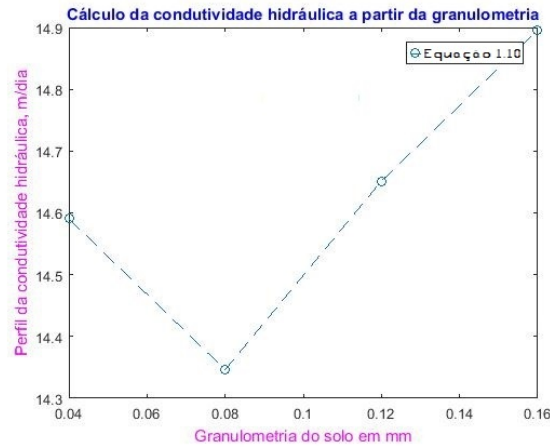


Fonte: O Autor, 2017

5.2, 5.3 e 5.4 nos gráficos de granulometria para estimar os valores de d_{50} , valor esse sendo o único parâmetro que varia na Eq. (3.10). Nota-se que, para os quatro pontos o valor da condutividade hidráulica se manteve na casa do 19,1 e 19,3 m/d

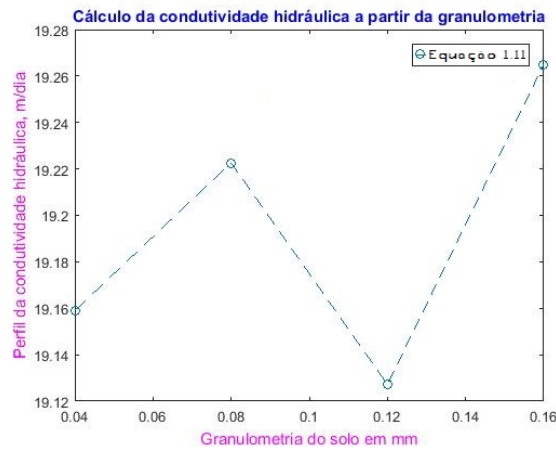
A figura 5.7 gerada pelo software matemático retorna valores de condutividade hidráulica para cada um dos quatro pontos amostrados, fez-se a leitura das figuras 5.1, 5.2, 5.3 e 5.4 nos gráficos de granulometria para estimar os valores de d_{60} , valor esse sendo o único parâmetro que varia na Eq. (3.11). Nota-se que, para os quatro pontos o valor da condutividade hidráulica se manteve na casa do 18,4 e 18,9 m/d

Figura 5.5 – Cálculo da condutividade hidráulica pela equação (3.9) a partir da granulometria



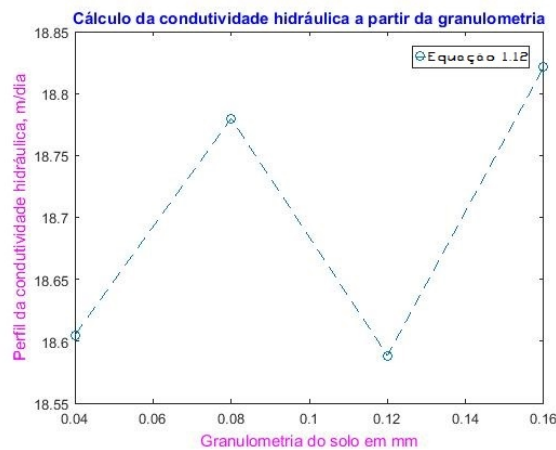
Fonte: O Autor, 2018

Figura 5.6 – Cálculo da condutividade hidráulica pela equação (3.10) a partir da granulometria



Fonte: O Autor, 2018

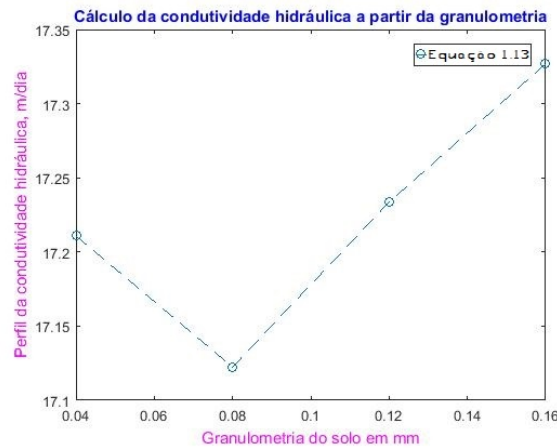
Figura 5.7 – Cálculo da condutividade hidráulica pela equação (3.11) a partir da granulometria



Fonte: O Autor, 2018

A figura 5.8 gerada pelo software de análise numérica retorna valores de condutividade hidráulica para cada um dos quatro pontos amostrados, fez-se a leitura das figuras 5.1, 5.2, 5.3 e 5.4 nos gráficos de granulometria para estimar os valores de $(d_{10})^2$, valor esse sendo o único parâmetro que varia na Eq. (3.12). Nota-se que, para os quatro pontos o valor da condutividade hidráulica se manteve na casa do 17,1 e 17,4 m/d

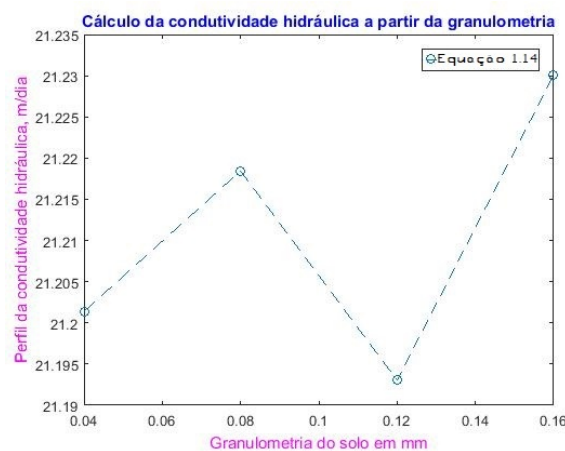
Figura 5.8 – Cálculo da condutividade hidráulica pela equação (3.12) a partir da granulometria



Fonte: O Autor, 2018

A figura 5.9 gerada pelo software de análise numérica retorna valores de condutividade hidráulica para cada um dos quatro pontos amostrados, fez-se a leitura das figuras 5.1, 5.2, 5.3 e 5.4 nos gráficos de granulometria para estimar os valores de $(d_{50})^2$, valor esse sendo o único parâmetro que varia na Eq. (3.13). Nota-se que, para os quatro pontos o valor da condutividade hidráulica se manteve na casa do 21,1 e 21,3 m/d

Figura 5.9 – Cálculo da condutividade hidráulica pela equação (3.13) a partir da granulometria

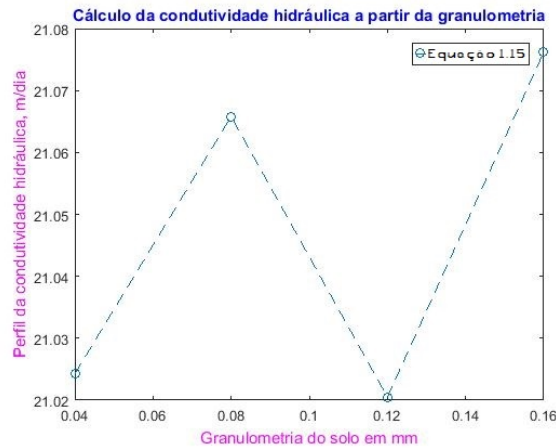


Fonte: O Autor, 2018

A figura 5.10 gerada pelo software de análise numérica retorna valores de condutividade hidráulica para cada um dos quatro pontos amostrados, fez-se a leitura das figuras

5.1, 5.2, 5.3 e 5.4 nos gráficos de granulometria para estimar os valores de $(d_{60})^2$, valor esse sendo o único parâmetro que varia na Eq. (3.14). Nota-se que, para os quatro pontos o valor da condutividade hidráulica se manteve na casa do 21,1 e 21,3 m/d

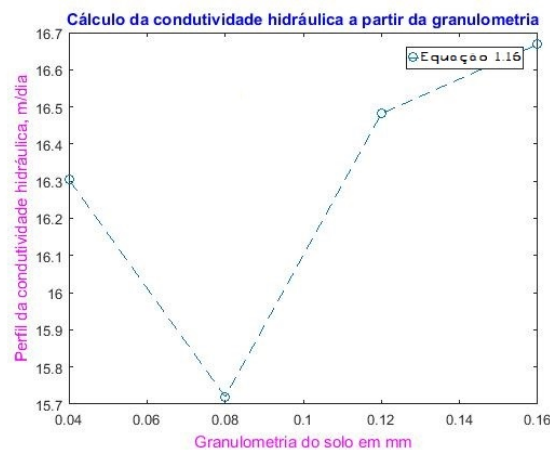
Figura 5.10 – Cálculo da condutividade hidráulica pela equação (3.14) a partir da granulometria



Fonte: O Autor, 2018

A figura 5.11 gerada pelo software de análise numérica retorna valores de condutividade hidráulica para cada um dos quatro pontos amostrados, fez-se a leitura das figuras 5.1, 5.2, 5.3 e 5.4 nos gráficos de granulometria para estimar os valores de d_{10} e d_{50} , valores esses sendo os únicos parâmetros que variam na Eq. (3.15). Nota-se que, para os quatro pontos o valor da condutividade hidráulica que variou de 15,7 e 16,7 m/d

Figura 5.11 – Cálculo da condutividade hidráulica pela equação (3.15) a partir da granulometria

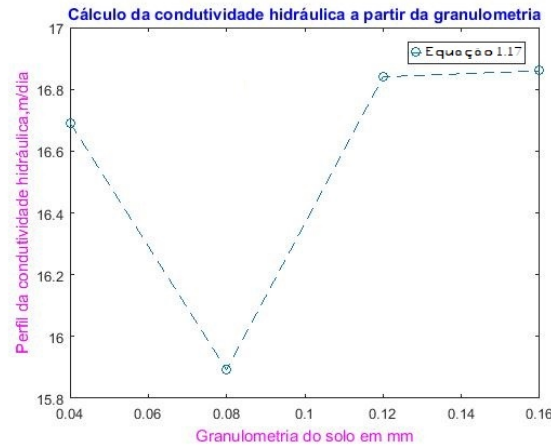


Fonte: O Autor, 2018

A figura 5.12 gerada pelo software de análise numérica retorna valores de condutividade hidráulica para cada um dos quatro pontos amostrados, fez-se a leitura das figuras 5.1, 5.2, 5.3 e 5.4 nos gráficos de granulometria para estimar os valores de d_{10} e d_{60} , valores esses

sendo os únicos parâmetros que variam na Eq. (3.16). Nota-se que, para os quatro pontos o valor da condutividade hidráulica que variou de 15,8 e 16,9 m/d

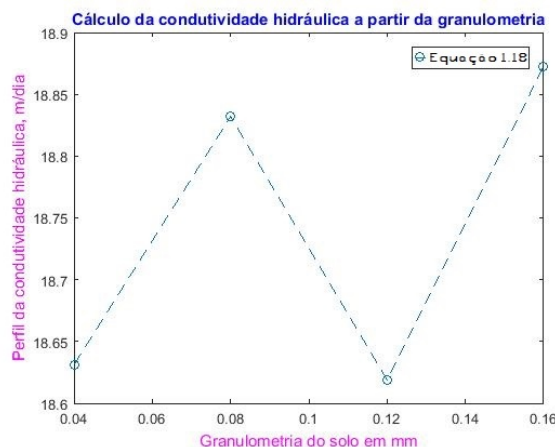
Figura 5.12 – Cálculo da condutividade hidráulica pela equação (3.16) a partir da granulometria



Fonte: O Autor, 2018

A figura 5.13 gerada pelo software de análise numérica retorna valores de condutividade hidráulica para cada um dos quatro pontos amostrados, fez-se a leitura das figuras 5.1, 5.2, 5.3 e 5.4 nos gráficos de granulometria para estimar os valores de d_{50} e d_{60} , valores esses sendo os únicos parâmetros que variam na Eq. (3.17). Nota-se que, para os quatro pontos o valor da condutividade hidráulica que variou de 18,6 e 19,9 m/d

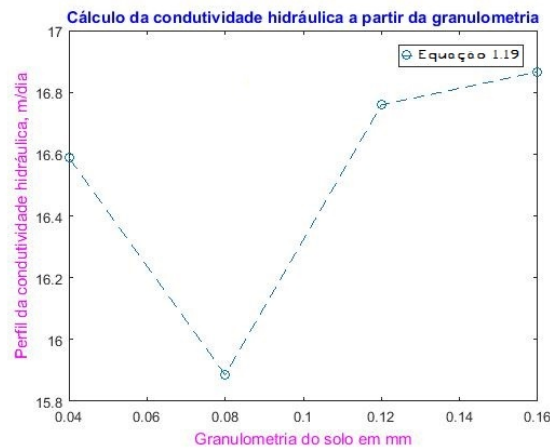
Figura 5.13 – Cálculo da condutividade hidráulica pela equação (3.17) a partir da granulometria



Fonte: O Autor, 2018

A figura 5.14 gerada pelo software de análise numérica retorna valores de condutividade hidráulica para cada um dos quatro pontos amostrados, fez-se a leitura das figuras 5.1, 5.2, 5.3 e 5.4 nos gráficos de granulometria para estimar os valores de d_{10} , d_{50} e d_{60} , valores esses sendo os únicos parâmetros que variam na Eq. (3.18). Nota-se que, para os quatro pontos o valor da condutividade hidráulica que variou de 18,6 e 19,9 m/d

Figura 5.14 – Cálculo da condutividade hidráulica pela equação (3.18) a partir da granulometria



Fonte: O Autor, 2018

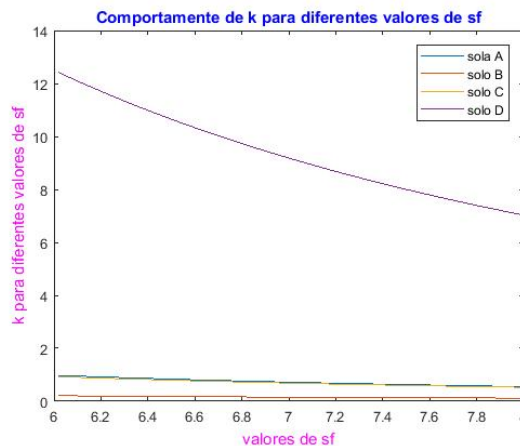
As equações empíricas que relacionam a granulometria apresentaram-se válidas para essa estimativa. Por essas equações (3.9) até (3.18), o potencial da condutividade hidráulica total variou pouco de uma equação para a outra, e tiveram variações muito pequenas quando comparado aos quatro pontos testados dentro da mesma equação. Portanto, para os solos estudados, a influência da granulometria foi de suma importância para a estimativa da condutividade hidráulica e as equações descritas no capítulo 3.5 do autor (SALARASHAYERI; SIOSEMARDE, 2012) retornaram valores aceitáveis.

Quando testada a variação de valores da condutividade hidráulica K com a variação do fator de forma SF , que define a forma dos grãos, mais arredondados ou mais rugosos, sendo esse último o que gera no solo maior volume de vazios por não haver encaixe compacto entre grãos, reparou-se que valores para os solos A , B e C não afetou em grandes variações valores de K , já no solo D o valor de K diminuiu substancialmente conforme o valor de SF aumentou como demonstrado na figura 5.15.

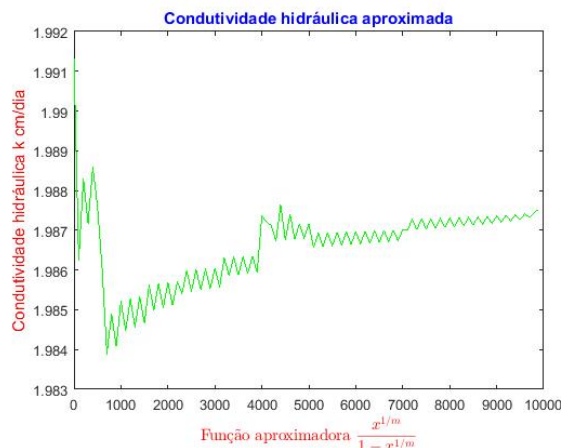
5.2 Resultados de valores de K a partir de valores amostrais da umidade θ do solo

A partir das análises realizadas no solo e dos dados de umidade θ obtidos pelo sensor, utilizou-se as informações para alimentar o sistema composto pela equação (4.10) e gerou-se a figura 5.16, nota-se que em média o valor da condutividade hidráulica K gira em torno de $19,86\text{ m/dia}$ ($1,986\text{ cm/dia}$)

Na figura 5.17 está descrito o gráfico da umidade para a Eq. (4.10) realizado com os dados do experimento realizados na UFCat, $\theta_r = 0,42$ e $\theta_s = 0,72$, sendo esses os valores mínimo e máximo, respectivamente, de umidade mensurados pelo sensor que foi instalado à 40 cm de profundidade, na UFCat, no mesmo local em que foi coletado as amostras de solo

Figura 5.15 – Comportamento da condutividade hidráulica K para diferentes valores de SF 

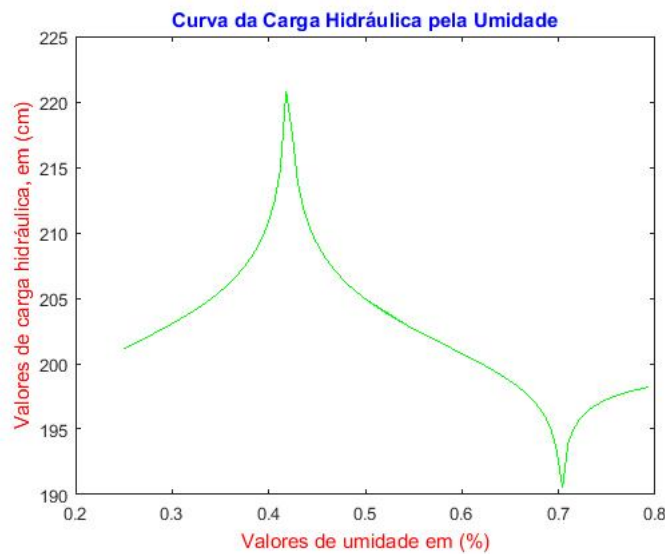
Fonte: O Autor, 2018

Figura 5.16 – Condutividade hidráulica K (cm/dia) aproximada

Fonte: O Autor, 2018

referentes a predição via granulometria mostradas no capítulo 3. O sensor ficou registrando valores de umidade por 4 dias em intervalos de 30 em 30 min . O valor da carga hidráulica h foi definido a partir da Eq. (4.10) pois não conseguiu-se laboratório disponível para que realizasse tal quantidade fosse mensurada. Os parâmetros α , m e n foram simulados como sendo 0,005, 2,0 e 0,50 respectivamente, pois foram os valores usados por (GENUCHTEN, 1980) como demonstrado na figura 4.8 e assim sendo possível comparar os dados. O gráfico mostrado na figura 5.17 mostra o mesmo comportamento em S que o mostrado na figura 4.8 quando observados os valores de umidade θ entre 0,42 e 0,72.

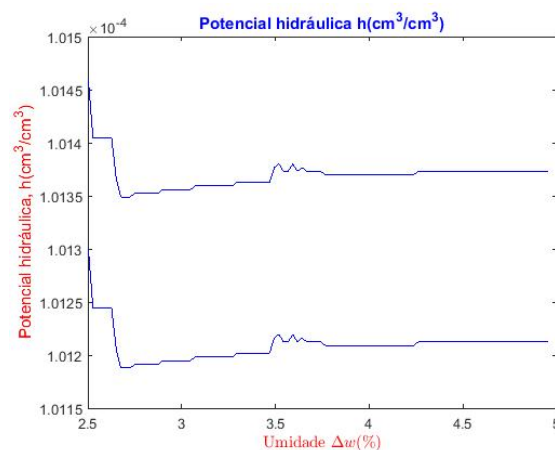
Figura 5.17 – Gráfico típico da umidade baseado na Eq. (4.10) a partir de dados experimentais e $\alpha = 0,005$, $m = 2,0$ e $n = 0,50$



Fonte: O autor, 2018

A partir da variação de umidade w (ou θ) pela equação (4.10) chegou-se a valores de potencial hidráulico h , note que em alguns pontos ocorreram descontinuidades, isso ocorre pelo fato de o solo não ser homogêneo, com seus perfis de solo diferentes, há também uma diferença do potencial hidráulico brusca, demonstrando onde ocorre as descontinuidades apresentadas na figura 5.18, a média do potencial hidráulico variou entre $1,01(\text{cm}^3/\text{cm}^3)$.

Figura 5.18 – Potencial hidráulico $h(\text{cm}^3/\text{cm}^3)$

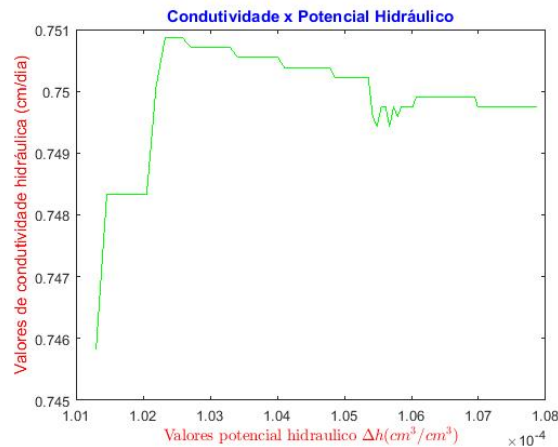


Fonte: O Autor, 2018

Na figura 5.19 pode-se ver o perfil da condutividade hidráulica em função da variação do gradiente hidráulico h . Para valores próximos de $h = 1,01(\text{cm}^3/\text{cm}^3)$ vê-se uma variação de condutividade hidráulica próximo de $K = 0,746(\text{cm}/\text{dia})$. A medida de h aumenta os valores de condutividade hidráulica vão aumentando até atingir um máximo próximo de

$K = 0,751(\text{cm}/\text{dia})$, isso dá um patamar para $h = 1,025(\text{cm}^3/\text{cm}^3)$. A partir deste valor os patamares para a condutividade hidráulica vão diminuindo até estabilizar em torno de 0,750.

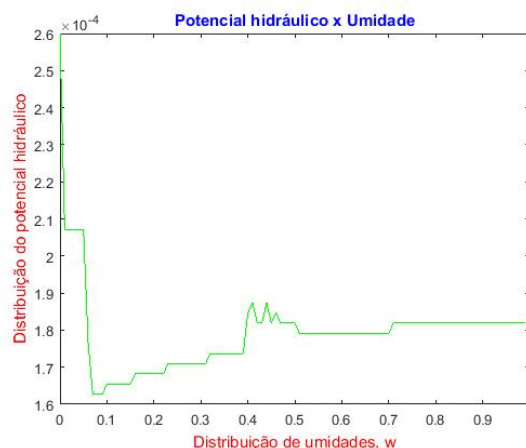
Figura 5.19 – Condutividade hidráulica K X Potencial hidráulico h



Fonte: O Autor, 2018

Para saber o quão sensível o valor do potencial hidráulico h varia conforme há variação da umidade, gerou-se a figura 5.20, onde pode-se notar que em valores acima do valor $\theta = 0,12$ que foi definido pelo ensaio de solo na tabela 4.1, no momento da coleta das amostras A, B, C e D , já descritas no capítulo 3. Como pode ser visto pela figura 4.3 o comportamento da carga hidráulica possui um transitório que compreende os valores para w entre 0 e 0,1 apresentado como perfil decrescente para valores de h ; a partir de $w = 0,1$ o perfil de carga hidráulica começa aumentar apresentando um perfil de saturação a partir de $w = 0,50$. O perfil descontínuo da figura mostra o caráter heterogêneo do solo. Este perfil também explica a variabilidade de valores captados pelo sensor.

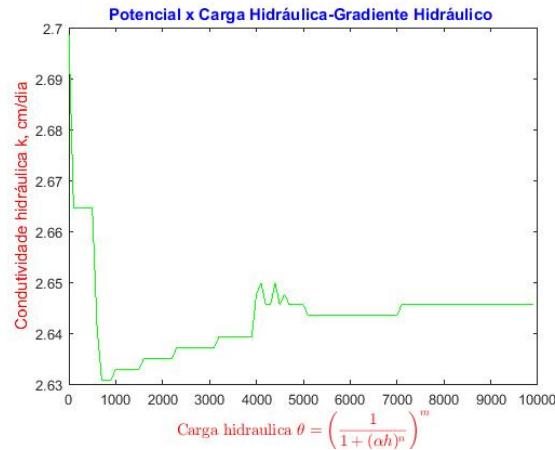
Figura 5.20 – Potencial hidráulico h X umidade θ (ou w)



Fonte: O Autor, 2018

A figura 5.21 apresenta a variação da condutividade hidráulica em função dos valores de carga hidráulica. Para obter a faixa de variação para os valores de h , foi necessário a partir da Eq. (4.3) escrever a carga hidráulica como função dos valores de umidade. Foi utilizado a Eq. (4.9). A faixa de valores para a condutividade hidráulica está entre 2,60 e 2,70 (cm/dia), o quê de acordo com (DAS, 2007), caracteriza o solo como sendo areia fina ou silte argilosas.

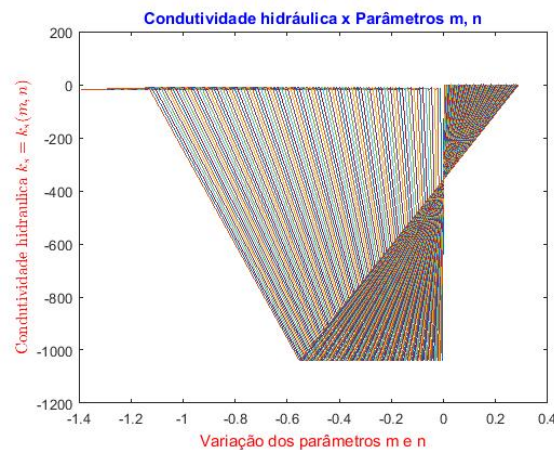
Figura 5.21 – Condutividade hidráulica $K_{(cm/dia)}$ X carga hidráulica $\theta = \left(\frac{1}{1+(\alpha h)^n}\right)^m$



Fonte: O Autor, 2018

A figura 5.22, mostra os efeitos dos parâmetros m e n no comportamento da condutividade hidráulica. conforme pode-se ver pela figura K , começa em torno de zero até valores de zero até 1000(cm/dia) o que de acordo com (DAS, 2007) o solo está na faixa compreendendo areias finas e argilo siltosas.

Figura 5.22 – Condutividade hidráulica X parâmetros m e n

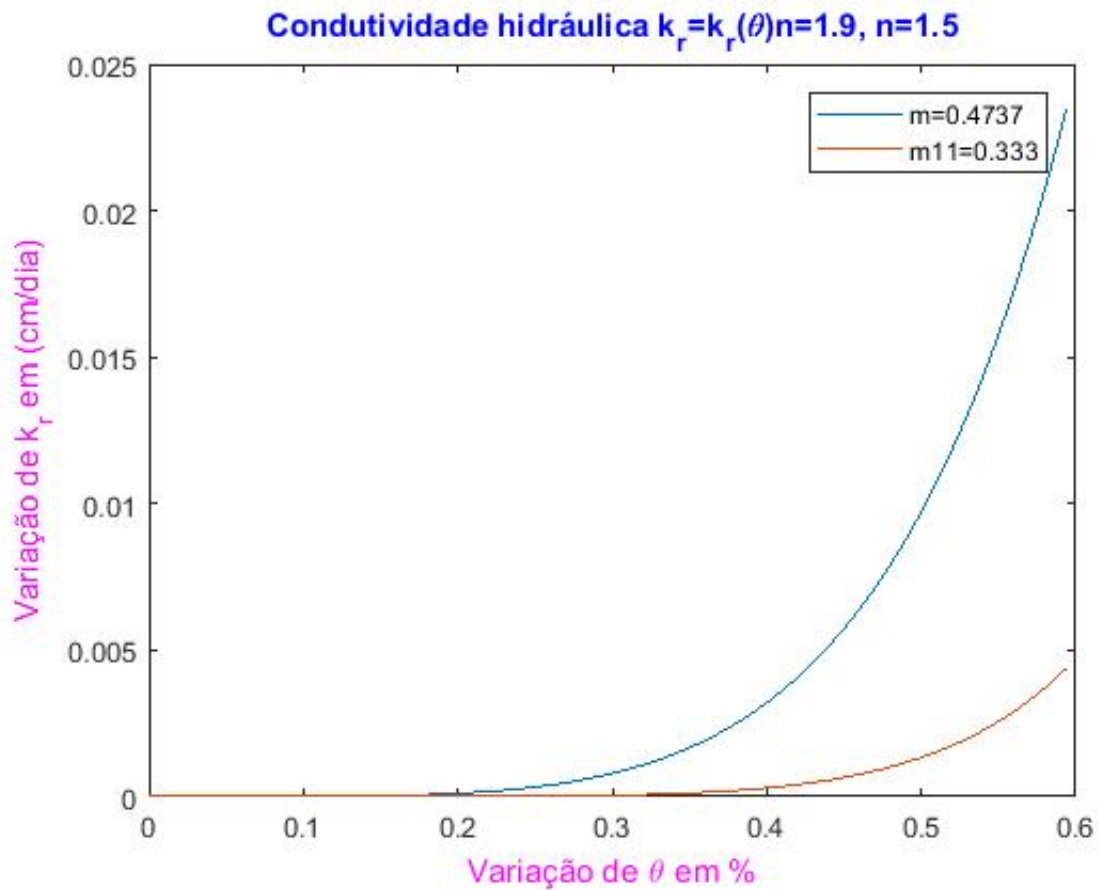


Fonte: O Autor, 2018

A Figura 5.23 apresenta os valores da condutividade hidráulica para solo K em função da umidade θ de acordo com a Eq. (4.18). Nesta figura os parâmetros m e n foram variados para determinar a influência dos mesmos nos valores de K . A figura apresenta dois

gráficos um para $n = 1,9$ e $n = 1,5$ gerando respectivamente $m = 0,4737$ e $m = 0,3330$. A partir da figura pode-se ver que a medida que valores de umidade vão aumentando os valores para a condutividade hidráulica também aumentam obedecendo o comportamento de uma parábola, para ambos os valores de n .

Figura 5.23 – Variação de condutividade hidráulica K versus variação do teor de umidade θ



Fonte: O autor, 2018

Capítulo 6

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Predizer valores de condutividade hidráulica para solos K foi primordial para conhecer-se o principal parâmetro descrito pela Lei de Darcy, a velocidade de infiltração de líquidos no solo v , uma vez que $v = Ki$; sendo K o parâmetro que comporta-se como um fator de resistência para a velocidade, isto quer dizer que, quanto menor for valores de K maior será a dificuldade do fluido em percorrer o volume de solo.

Os valores da condutividade hidráulica K tanto para as análises feitas a partir de dados da granulometria, quanto para as realizadas a partir dos dados do teor de umidade no solo θ , convergiram para valores próximos, em torno de $19m/dia$, tornando assim viável os sistemas testados, fazendo necessário ainda a validação dos dados a partir da análise laboratorial de condutividade hidráulica K como demonstrado na figura 3.3.

Para finalidade de comparação de resultados de condutividade hidráulica e uma possível validação dos dados, os resultados de Eq. (3.10) obtidos a partir de valores de granulometria pelo parâmetro D_{50} convergiram à aproximadamente $19m/dia$, já o valor de condutividade hidráulica obtido a partir de parâmetros de umidade θ também convergiram para valores próximos de $19m/dia$, sendo assim o resultado mais confiável até o presente momento, fazendo necessário ainda a validação dos dados com análises laboratoriais.

6.1 Trabalhos Futuros

Com o estudo apresentado nesse trabalho, o próximo passo seria o uso dos valores estimados da condutividade hidráulica, K , no modelo de Darcy para o escoamento de fluidos em meios porosos. Esta metodologia permite a análise de infiltrações no solo que, se não for devidamente estimada, pode causar sérios danos à estrutura. O cálculo de infiltração se dá através de formulações que levam a equações diferenciais parciais para o potencial hidráulico. Pretende-se validar os modelos empíricos analisados no presente trabalho para em seguida comparar com dados experimentais de valores para a condutividade hidráulica.

Utilizando-se de métodos numéricos para equações diferenciais parciais, pretende-se obter o perfil do fluxo de água em meios porosos para fazer as estimativas confiáveis da estabilidade de estruturas de contenção. Com esse estudo pretendemos expandir os horizontes e analisar solos que contenham corpos d'água próximos, como por exemplo uma barragem de rejeitos de mineração, represas, lagoas aeróbicas e anaeróbicas de estações tratamento de esgoto, lagoas de chorume provenientes do resíduo sólido urbano, dentre outros.

Trabalhos com os dados desse experimento em teores de umidade, θ , θ_r e θ_s , serão posteriormente trabalhados e publicados para a obtenção da difusividade D do solo da UF-Cat. Mais estudos granulométricos devem ser realizados a partir dos parâmetros d_{10} , d_{50} e d_{60} .

Para validar e refinar nosso modelo e parâmetros indefinidos m , n e α , serão feitos testes laboratoriais com permeâmetros, comparando assim o resultado predito com o real.

REFERÊNCIAS

AHUJA, L. R.; SWARTZENDRUBER, D. An improved form of soil-water diffusivity function. *Soil Sci. Soc.*, n. 36, p. 9–14, 1972. Citado na página 50.

ALYAMANI, M.; SEN, Z. Determination hydraulic conductivity from particle size distribution curves. *Ground Water*, v. 31, n. 4. Citado na página 33.

AMARESH, R. P. D. Capillarity-induced resonance of blobs in a 3-d duct: lattice boltzmann modelling. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 65, p. 635648, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 56 e 57.

BOADU, F. K. Hydraulic conductivity of soils from grain-size distribution: New models. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, v. 126, p. 739–746, 2000. Citado na página 33.

BRASIL. NBR-6508 - Grãos de solo que passam na peneira 4,8mm - Determinação da massa específica. [S.l.]: Governo do Brasil, 1984. ABNT. 8 p. Citado na página 32.

_____. *Peneiras para ensaio com telas de tecido metálico*. [S.l.]: Governo do Brasil, 1988. ABNT. 14 p. Citado na página 32.

_____. *ABNT 3310 - Peneiras de ensaio - Requisitos técnicos e verificação Parte 1: Peneiras de ensaio com tela de tecido metálico (ISO 3310-1, IDT)*. [S.l.]: Governo do Brasil, 2010. ABNT. 20 p. Citado na página 32.

_____. *ABNT NBR 6457:2016 - Amostras de Solo - Preparação Para Ensaio de Compactação e Ensaio de Caracterização - Método de Ensaio*. [S.l.]: Governo do Brasil, 2016. ABNT. 8 p. Citado na página 32.

_____. *ABNT NBR 7181:2016 - Solo-Análise Granulométrica - Método de Ensaio*. [S.l.]: Governo do Brasil, 2016. ABNT. 12 p. Citado na página 32.

BROOKS, H. R.; COREY, A. T. Hydraulic properties of porous media. *Hydrology Paper*, n. 3, 1964. Citado na página 48.

BRUCE, R. R. Hydraulic conductivity evaluation of the soil profile from soil water retention relations. *Soil Sci. Soc.*, n. 36, p. 555–561, 1972. Citado na página 48.

BURDINE, N. T. Relative permeability calculations from pore-size distribution data. *Inst. Mining Metall Eng.*, n. 198, p. 71–77, 1976. Citado 2 vezes nas páginas 48 e 59.

- CHAKRABORTY, D. *et al.* Prediction of hydraulic conductivity of soils from particle-size distribution. *CURRENT SCIENCE*, v. 90, n. 11, p. 1526–1531, 2006. Citado na página 33.
- CIRPKA, O. A. *Environmental Fluid Mechanics I: Flow in Natural Hydrosystems*. [S.l.]: books, 2003. Citado na página 33.
- DAS, B. M. *Fundamentals of geotechnical engineering*. [S.l.]: Chris Carson, 2007. Citado 7 vezes nas páginas 29, 30, 31, 32, 34, 35 e 80.
- ENDELMAN, F. J. *et al.* The mathematical modeling of soil-water-nitrogen phenomena. *Oak Ridge National Laboratory*, n. EDFB-IBP-74-8, 1974. Citado na página 50.
- FALLS, L. W. The beta distribution: a statical model for world cloud cover. (*NASA Technical Memorandum*, TMX, n. 64714), p. 1–6, 1973. Citado na página 50.
- FREEZE, R. A.; CHERRY, J. A. *Groundwater*. *Prentice Hall Inc. Englewood Cliffs, New Jersey*, 1979. Citado na página 33.
- GENUCHTEN, M. T. V. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soils Science Society of America Journal*, v. 44, n. 5, p. 892–898, 1980. Citado 13 vezes nas páginas 11, 13, 15, 29, 33, 48, 49, 50, 52, 53, 56, 57 e 77.
- GENUCHTEN, M. T. V.; LEJI, F. On estimating the hydraulic properties of unsaturated soils. *In Proceedings of the International Workshop on Indirect Method of Estimating Hydraulic Properties of Unsaturated Soils US Salinity Laboratory and Department of Soil and Environmental Science, Univ. of California, Riverside*, p. 1–14, 1992. Citado na página 33.
- GONÇALVES-FILHO, J. C. C. *et al.* Análise computacional da condutividade hidráulica a partir da granulometria de solo localizado na universidade federal de Goiás/regional catalão. *XX-ENMC – Encontro Nacional de Modelagem Computacional e VIII ECTM – Encontro de Ciências e Tecnologia de Materiais*, p. 8p., 2017. Citado 2 vezes nas páginas 11 e 13.
- _____. *SPPGI V - Simpósio de Pesquisa Pós Graduação e Inovação: Análise numérica da condutividade hidráulica a partir de modelos empíricos*. [S.l.: s.n.], 2017. Citado 2 vezes nas páginas 11 e 13.
- GREEN, R. E.; COREY, J. C. Calculation of hydraulic conductivity: a further evouation of some predictive methods. *Soil Sci. Soc.*, n. 35, p. 3–8, 1971. Citado na página 48.
- GROTZINGER, T. J. J. *Para entender a Terra*. [S.l.: s.n.], 2013. Citado na página 30.
- HAVERKAMP, R. *et al.* A comparison of numerical simulation models for one-dimensional infiltration. *Soil Sci. Soc.*, n. 41, p. 285–294, 1977. Citado na página 50.
- HAZEN, N. L.; DURRETT, M. E. Relationship of security of attachment to exploration and cognitive mapping abilities in 2-year-olds. *Developmental psychology*, American Psychological Association, v. 18, n. 5, p. 751, 1982. Citado na página 34.
- JACKSON, R. D. On the calculation of hydraulic conductivity. *Soil Sci. Soc.*, n. 36, p. 380–382, 1972. Citado 2 vezes nas páginas 47 e 48.
- JACKSON, R. D.; REGINATO, R. J.; BAVEL, C. H. M. van. Comparison of measured and calculated hydraulic conductivities of unsaturated soils. *Water Resour*, n. 1, p. 375–380, 1965. Citado na página 48.

- JEPPSON, R. W. Axisymmetric infiltration in soils: Numerical techniques for solution. *J. Hydrol.*, n. 23, p. 111–130, 1974. Citado na página 48.
- MARQUES, P. L. L. W. G. T. A. M. R. J. D. Estudo de parâmetros físicos, químicos e hídricos de um latossolo amarelo, na região amazônica. *Acta Amazônica*, v. 34, n. 2, p. 145–154, 2004. Citado na página 29.
- MILLINGTON, J. R.; QUIRK, J. P. Permeability of porous solids. *Trans. Faraday Soc.*, n. 57, p. 1200–1206, 1961. Citado 2 vezes nas páginas 47 e 48.
- MUALEM, Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resour.*, p. 593–622, 1976. Citado 4 vezes nas páginas 33, 48, 49 e 59.
- REEVES, M.; DUGUIUD, J. O. Water movement through saturated-undersaturated porous media: A finite element galerkin model. *Oak Ridge National Laboratory*, p. 246p., 1975. Citado 2 vezes nas páginas 33 e 47.
- SALARASHAYERI, A.; SIOSEMARDE, M. Prediction of soil hydraulic conductivity from particle-size distribution. *International Journal of Environmental, Chemical, Ecological, Geological and Geophysical Engineering*, v. 6, n. 1, p. 16–20, 2012. Citado 10 vezes nas páginas 11, 13, 29, 31, 32, 33, 34, 43, 68 e 76.
- SEFAC. *Usina Serra do Facão*. 2018. Citado na página 30.
- SEGOL, G. A three-dimensional galerkin finite element model for the analysis of contaminant transport in variably saturated porous media. *Dep. of Earth Sciences of Univ. of Waterloo, Canada*, 1976. Citado 2 vezes nas páginas 33 e 47.
- SHAO, M.; ROBERT, H. Integral method of soil hydraulic properties. *Soil Science Society of America Journal*, v. 62, n. 677, p. 585–592, 1998. Citado na página 33.
- TODD, D. K.; MAYS, L. *Groundwater Hydrology*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2005. Citado na página 33.
- TYLER, S. W.; WHEATCRAFT, S. W. Application of fractal mathematics to soil water retention estimation. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, v. 53, p. 987–996, 1989. Citado na página 33.
- TZIMOPOULOS, C. D.; SAKILLARIOU-MAKRANTONAKI, M. A new analytic model to predict the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Water resource management*, v. 10, p. 397–414, 1996. Citado na página 29.
- VANES, R. L. H. R. R. S. T. T. H. M. Integrated assessment of space, time, and management-related variability of soil hydraulic properties. *Soil Science Society of American Journal*, v. 63, p. 1599–1608, 1999. Citado na página 29.
- VAUCLIN, M.; HAVERKAMP, R.; VACHAUD, G. Résolution numérique d'une equation de diffusion non linéaire. *Universitaires de Grenoble, France*, 1979. Citado 2 vezes nas páginas 33 e 47.
- WANG, Y.; MA, J.; GUAN, H. A mathematically continuous model for describe the hydraulic properties of unsaturated porous media over the entire range of matric. *Hydrology*, v. 541, p. 873–888, 2016. Citado na página 29.

APÊNDICE A

Códigos

Algoritmo A.1:

```

1  m=0.65
2  para cada  $i = 1 : 100$  faça
3  |    $\theta(1) = 42$   $\theta(2) = 58$   $\theta(3) = 58$   $\theta(4) = 58$   $\theta(5) = 58$ 
   |    $\theta(6) = 58$   $\theta(7) = 69$   $\theta(8) = 74$   $\theta(9) = 74$   $\theta(10) = 74$ 
   |    $\theta(11) = 73$   $\theta(12) = 73$   $\theta(13) = 73$   $\theta(14) = 73$   $\theta(15) = 73$ 
   |    $\theta(16) = 73$   $\theta(17) = 72$   $\theta(18) = 72$   $\theta(19) = 72$   $\theta(20) = 72$ 
   |    $\theta(21) = 72$   $\theta(22) = 72$   $\theta(23) = 72$   $\theta(24) = 71$   $\theta(25) = 71$ 
   |    $\theta(26) = 71$   $\theta(27) = 71$   $\theta(28) = 71$   $\theta(29) = 71$   $\theta(30) = 71$ 
   |    $\theta(31) = 71$   $\theta(32) = 71$   $\theta(33) = 70$   $\theta(34) = 70$   $\theta(35) = 70$ 
   |    $\theta(36) = 70$   $\theta(37) = 70$   $\theta(38) = 70$   $\theta(39) = 70$   $\theta(40) = 70$ 
   |    $\theta(41) = 66$   $\theta(42) = 65$   $\theta(43) = 67$   $\theta(44) = 67$   $\theta(45) = 65$ 
   |    $\theta(46) = 67$   $\theta(47) = 66$   $\theta(48) = 67$   $\theta(49) = 67$   $\theta(50) = 67$ 
   |    $\theta(51) = 67$   $\theta(52) = 68$   $\theta(53) = 68$   $\theta(54) = 68$   $\theta(55) = 68$ 
   |    $\theta(56) = 68$   $\theta(57) = 68$   $\theta(58) = 68$   $\theta(59) = 68$   $\theta(60) = 68$ 
   |    $\theta(61) = 68$   $\theta(62) = 68$   $\theta(63) = 68$   $\theta(64) = 68$   $\theta(65) = 68$ 
   |    $\theta(66) = 68$   $\theta(67) = 68$   $\theta(68) = 68$   $\theta(69) = 68$   $\theta(70) = 68$ 
   |    $\theta(71) = 68$   $\theta(72) = 67$   $\theta(73) = 67$   $\theta(74) = 67$   $\theta(75) = 67$ 
   |    $\theta(76) = 67$   $\theta(77) = 67$   $\theta(78) = 67$   $\theta(79) = 67$   $\theta(80) = 67$ 
   |    $\theta(81) = 67$   $\theta(82) = 67$   $\theta(83) = 67$   $\theta(84) = 67$   $\theta(85) = 67$ 
   |    $\theta(86) = 67$   $\theta(87) = 67$   $\theta(88) = 67$   $\theta(89) = 67$   $\theta(90) = 67$ 
   |    $\theta(91) = 67$   $\theta(92) = 67$   $\theta(93) = 67$   $\theta(94) = 67$   $\theta(95) = 67$ 
   |    $\theta(96) = 67$   $\theta(97) = 67$   $\theta(98) = 67$   $\theta(99) = 67$   $\theta(100) = 67$ 
4  |    $\theta = 0.01 * \theta$   $\theta_{right} = 47.5$   $\theta_{left} = 66.5$ 
5  |   para cada  $i = 1 : 100$  faça
6  |   |    $\Theta(i) = (\theta(i) - \theta_{right}) / (\theta_{right} - \theta_{left})$ 
7  |   para cada  $i1 = 1 : 100$  faça
8  |   |    $soma_{par}(i1) = 0$   $soma_{impar}(i1) = 0$ 
9  |   para cada  $i1 = 1 : 100$  faça
10 |   |   for para cada  $j = 1 : 100$  faça
11 |   |   |    $h1(i1) = \Theta(i1) / 100$   $x(i1, j) = \Theta(i1) + j * h1(i1)$ 
   |   |   |    $potencial_{hidraulico}(i1, j) = x(i1, j)^{(1/0.33)} / ((67.5 - x(i1, j))^{(1/0.33)})$ 
   |   |   |    $potencial_{hidraulico} = real(potencial_{hidraulico})$ 
12 |   |    $aux1 = 0$   $aux2 = 0$ 
13 |   para cada  $i1 = 1 : 100$  faça
14 |   |   para cada  $j = 1 : 100$  faça
15 |   |   |    $if mod(j, 2) == 0$ 
   |   |   |   |    $soma_{par}(i1) = soma_{par}(i1) + potencial_{hidraulico}(i1, j)$  else
   |   |   |   |    $soma_{impar}(i1) = soma_{impar}(i1) + potencial_{hidraulico}(i1, j)$ 

```

```

1 para cada  $i1 = 1 : 100$  faça
2    $\lfloor$   $somatotal(i1) = somapar(i1) + somaimpar(i1)$ 
3    $a1 = 0$   $b1 = 1$   $n2 = 100$   $h2 = (b1 - a1)/n2$ 
4    $xIzero = (a1 - thetaright)/(thetaright - thetleft)$ 
5   para cada  $i1 = 1 : 100$  faça
6      $\lfloor$   $xI1(i1) = 0$   $xI2(i1) = 0$ 
7      $somapar = 0$   $somaimpar = 0$ 
8     para cada  $i1 = 1 : 100$  faça
9        $x1(i1) = a1 + i1 * h2$  if  $mod(i1,2) == 0$ 
10       $somapar = somapar + x1(i1)^{(1/0.33)}/(67.5 - x1(i1)^{(1/0.33)})$  else
10       $somaimpar = somaimpar + x1(i1)^{(1/0.33)}/(67.5 - x1(i1)^{(1/0.33)})$ 
10       $integralf1 = h2 * (xIzero + 2 * somaimpar + 4 * somapar)/3$ 
11   para cada  $i = 1 : 100$  faça
12      $\lfloor$   $marcos(i) = (i - 1) * 100$ 
13   para cada  $i1 = 1 : 100$  faça
14      $\lfloor$   $somafinal(i1) = Theta(i1)^{0.5} * somatotal(i1)/integralf1$ 
15    $plot(marcos, somafinal, 'Color', 'g')$ 

```

Algoritmo .2:

```

1  m=0.65
2  para cada i = 1 : 100 faça
3  |   theta(1) = 42 theta(2) = 58 theta(3) = 58 theta(4) = 58 theta(5) = 58
   |   theta(6) = 58 theta(7) = 69 theta(8) = 74 theta(9) = 74 theta(10) = 74
   |   theta(11) = 73 theta(12) = 73 theta(13) = 73 theta(14) = 73 theta(15) = 73
   |   theta(16) = 73 theta(17) = 72 theta(18) = 72 theta(19) = 72 theta(20) = 72
   |   theta(21) = 72 theta(22) = 72 theta(23) = 72 theta(24) = 71 theta(25) = 71
   |   theta(26) = 71 theta(27) = 71 theta(28) = 71 theta(29) = 71 theta(30) = 71
   |   theta(31) = 71 theta(32) = 71 theta(33) = 70 theta(34) = 70 theta(35) = 70
   |   theta(36) = 70 theta(37) = 70 theta(38) = 70 theta(39) = 70 theta(40) = 70
   |   theta(41) = 66 theta(42) = 65 theta(43) = 67 theta(44) = 67 theta(45) = 65
   |   theta(46) = 67 theta(47) = 66 theta(48) = 67 theta(49) = 67 theta(50) = 67
   |   theta(51) = 67 theta(52) = 68 theta(53) = 68 theta(54) = 68 theta(55) = 68
   |   theta(56) = 68 theta(57) = 68 theta(58) = 68 theta(59) = 68 theta(60) = 68
   |   theta(61) = 68 theta(62) = 68 theta(63) = 68 theta(64) = 68 theta(65) = 68
   |   theta(66) = 68 theta(67) = 68 theta(68) = 68 theta(69) = 68 theta(70) = 68
   |   theta(71) = 68 theta(72) = 67 theta(73) = 67 theta(74) = 67 theta(75) = 67
   |   theta(76) = 67 theta(77) = 67 theta(78) = 67 theta(79) = 67 theta(80) = 67
   |   theta(81) = 67 theta(82) = 67 theta(83) = 67 theta(84) = 67 theta(85) = 67
   |   theta(86) = 67 theta(87) = 67 theta(88) = 67 theta(89) = 67 theta(90) = 67
   |   theta(91) = 67 theta(92) = 67 theta(93) = 67 theta(94) = 67 theta(95) = 67
   |   theta(96) = 67 theta(97) = 67 theta(98) = 67 theta(99) = 67
   |   theta(100) = 67
4  |   theta = 0.01 * theta thetaright = 47.5 thetaleft = 66.5
5  |   para cada i = 1 : 100 faça
6  | |   Theta(i) = (theta(i) – thetaright)/(thetaright – thetaleft)
7  |   para cada i1 = 1 : 100 faça
8  | |   somalpar(i1) = 0 somalimpar(i1) = 0
9  |   m = 0.69234 n = 1/(1 – m) alpha = 5100
10 |   para cada i1 = 1 : 100 faça
11 | |   for para cada j = 1 : 100 faça
12 | | |   h1(i1) = Theta(i1)/100 x(i1, j) = Theta(i1) + j * h1(i1)
   | | |   potencialhidraulico(i1, j) = ((x(i1, j)(-1/m) – 1)(1/n))/(alpha)
   | | |   potencialhidraulico = real(potencialhidraulico)
13 |   para cada i1 = 1 : 100 faça
14 | |   para cada j = 1 : 100 faça
15 | | |   if mod(j, 2) == 0
   | | | |   somalpar(i1) = somalpar(i1) + potencialhidraulico(i1, j) else
   | | | |   somalimpar(i1) = somalimpar(i1) + potencialhidraulico(i1, j)

```

```

1 para cada  $i1 = 1 : 100$  faça
2    $somatotal(i1) = somalpar(i1) + somalimpar(i1)$ 
3  $a1 = 0$   $b1 = 1$   $n2 = 100$   $h2 = (b1 - a1)/n2$ 
4  $xIzero = (a1 - thetaright)/(thetaright - thetaleft)$ 
5 para cada  $i1 = 1 : 100$  faça
6    $xI1(i1) = 0$   $xI2(i1) = 0$ 
7 para cada  $i1 = 1 : 100$  faça
8    $x1(i1) = a1 + i1 * h2$  if  $mod(i1, 2) == 0$ 
9      $xI1(i1) = xI1(i1) + (x1(i1)^{(-1/m)} - 1)^{(1/n)} / alpha$ 
10    else
11      $xI2(i1) = xI2(i1) + (x1(i1)^{(-1/m)} - 1)^{(1/n)} / alpha$ 
12      $xI(i1) = h2 * (xIzero + 2 * xI2(i1) + 4 * xI1(i1)) / 3$ 
13 para cada  $i1 = 1 : 100$  faça
14    $somafinal(i1) = Theta(i1)^{0.5} * somatotal(i1) / xI(i1)$ 
15 para cada  $i = 1 : 100$  faça
16    $marcos(i) = (i - 1) * 100$ 
17 para cada  $i = 1 : 100$  faça
18   para cada  $j = 1 : 100$  faça
19      $condutividade(i, j) = (1 - (alpha * potencialhidraulico(i, j) * (1 + alpha * potencialhidraulico(i, j))^{(1/n)} - 1)^{(-1/m)})^2 / (1 + (alpha * potencialhidraulico(i, j))^{(m/2)})$ 
20 para cada  $i = 1 : 100$  faça
21   para cada  $j = 1 : 1$  faça
22      $condutividade1(i, j) = condutividade(i, j)$ 
23  $figure(1)$   $plot(marcos, somafinal, 'Color', 'g')$   $figure(2)$ 
24  $plot(x(1,:), potencialhidraulico(:, 1), x(1,:), potencialhidraulico(:, 2))$ 
25  $figure(3)$   $plot(potencialhidraulico(1,:), condutividade1, 'Color', 'g')$ 

```

Algoritmo .3:

```

1 m=0.65
2 para cada i = 1 : 100 faça
3   theta(1) = 42 theta(2) = 58 theta(3) = 58 theta(4) = 58 theta(5) = 58
   theta(6) = 58 theta(7) = 69 theta(8) = 74 theta(9) = 74 theta(10) = 74
   theta(11) = 73 theta(12) = 73 theta(13) = 73 theta(14) = 73
   theta(15) = 73 theta(16) = 73 theta(17) = 72 theta(18) = 72
   theta(19) = 72 theta(20) = 72 theta(21) = 72 theta(22) = 72
   theta(23) = 72 theta(24) = 71 theta(25) = 71 theta(26) = 71
   theta(27) = 71 theta(28) = 71 theta(29) = 71 theta(30) = 71
   theta(31) = 71 theta(32) = 71 theta(33) = 70 theta(34) = 70
   theta(35) = 70 theta(36) = 70 theta(37) = 70 theta(38) = 70
   theta(39) = 70 theta(40) = 70 theta(41) = 66 theta(42) = 65
   theta(43) = 67 theta(44) = 67 theta(45) = 65 theta(46) = 67
   theta(47) = 66 theta(48) = 67 theta(49) = 67 theta(50) = 67
   theta(51) = 67 theta(52) = 68 theta(53) = 68 theta(54) = 68
   theta(55) = 68 theta(56) = 68 theta(57) = 68 theta(58) = 68
   theta(59) = 68 theta(60) = 68 theta(61) = 68 theta(62) = 68
   theta(63) = 68 theta(64) = 68 theta(65) = 68 theta(66) = 68
   theta(67) = 68 theta(68) = 68 theta(69) = 68 theta(70) = 68
   theta(71) = 68 theta(72) = 67 theta(73) = 67 theta(74) = 67
   theta(75) = 67 theta(76) = 67 theta(77) = 67 theta(78) = 67
   theta(79) = 67 theta(80) = 67 theta(81) = 67 theta(82) = 67
   theta(83) = 67 theta(84) = 67 theta(85) = 67 theta(86) = 67
   theta(87) = 67 theta(88) = 67 theta(89) = 67 theta(90) = 67
   theta(91) = 67 theta(92) = 67 theta(93) = 67 theta(94) = 67
   theta(95) = 67 theta(96) = 67 theta(97) = 67 theta(98) = 67
   theta(99) = 67 theta(100) = 67
4 theta = 0.01 * theta thetaright = 47.5 thetaleft = 66.5
5 para cada i = 1 : 100 faça
6   Theta(i) = (theta(i) - thetaright)/(thetaright - thetaleft)
7 m = 0.69234 n = 1/(1 - m) alpha = 5100
8 para cada i1 = 1 : 100 faça
9   potencialhidraulico(i1) = ((theta(i1)(-1/m) - 1)(1/n))/(alpha)
   potencialhidraulico = real(potencialhidraulico)
10 a = 0 b = 1 n = 100 h = (b - a)/n
11 para cada i = 1 : n faça
12   x(i) = a + (i - 1) * h
13 plot(x, potencialhidraulico, 'Color', 'g')

```

Algoritmo .4:

```

1  m=0.65
2  para cada i = 1 : 100 faça
3  |   theta(1) = 42 theta(2) = 58 theta(3) = 58 theta(4) = 58 theta(5) = 58
   |   theta(6) = 58 theta(7) = 69 theta(8) = 74 theta(9) = 74 theta(10) = 74
   |   theta(11) = 73 theta(12) = 73 theta(13) = 73 theta(14) = 73
   |   theta(15) = 73 theta(16) = 73 theta(17) = 72 theta(18) = 72
   |   theta(19) = 72 theta(20) = 72 theta(21) = 72 theta(22) = 72
   |   theta(23) = 72 theta(24) = 71 theta(25) = 71 theta(26) = 71
   |   theta(27) = 71 theta(28) = 71 theta(29) = 71 theta(30) = 71
   |   theta(31) = 71 theta(32) = 71 theta(33) = 70 theta(34) = 70
   |   theta(35) = 70 theta(36) = 70 theta(37) = 70 theta(38) = 70
   |   theta(39) = 70 theta(40) = 70 theta(41) = 66 theta(42) = 65
   |   theta(43) = 67 theta(44) = 67 theta(45) = 65 theta(46) = 67
   |   theta(47) = 66 theta(48) = 67 theta(49) = 67 theta(50) = 67
   |   theta(51) = 67 theta(52) = 68 theta(53) = 68 theta(54) = 68
   |   theta(55) = 68 theta(56) = 68 theta(57) = 68 theta(58) = 68
   |   theta(59) = 68 theta(60) = 68 theta(61) = 68 theta(62) = 68
   |   theta(63) = 68 theta(64) = 68 theta(65) = 68 theta(66) = 68
   |   theta(67) = 68 theta(68) = 68 theta(69) = 68 theta(70) = 68
   |   theta(71) = 68 theta(72) = 67 theta(73) = 67 theta(74) = 67
   |   theta(75) = 67 theta(76) = 67 theta(77) = 67 theta(78) = 67
   |   theta(79) = 67 theta(80) = 67 theta(81) = 67 theta(82) = 67
   |   theta(83) = 67 theta(84) = 67 theta(85) = 67 theta(86) = 67
   |   theta(87) = 67 theta(88) = 67 theta(89) = 67 theta(90) = 67
   |   theta(91) = 67 theta(92) = 67 theta(93) = 67 theta(94) = 67
   |   theta(95) = 67 theta(96) = 67 theta(97) = 67 theta(98) = 67
   |   theta(99) = 67 theta(100) = 67
4  |   theta = 0.01 * theta thetaright = 47.5 thetaleft = 66.5
5  |   para cada i = 1 : 100 faça
6  |   |   Theta(i) = (theta(i) - thetaright) / (thetaright - thetaleft)
7  |   |   m = 0.69234 n = 1 / (1 - m) alpha = 5100 L = 4
8  |   |   para cada i1 = 1 : 100 faça
9  |   |   |   potencialhidraulico(i1) = ((theta(i1)(-1/m) - 1)(1/n)) / (alpha)
   |   |   |   potencialhidraulico = real(potencialhidraulico)
10 |   |   para cada i = 1 : 100 faça
11 |   |   |   gradientehidraulico(i) =
   |   |   |   L(-1) * m(-1) * n(-1) * alpha(-1) * (Theta(i)(-1/m) - 1)(n(-1) - 1)
   |   |   |   gradientehidraulico = real(gradientehidraulico)
12 |   |   plot(gradientehidraulico)

```

Algoritmo .5:

```

1  m=0.65
2  para cada i = 1 : 100 faça
3  |   theta(1) = 42 theta(2) = 58 theta(3) = 58 theta(4) = 58 theta(5) = 58
   |   theta(6) = 58 theta(7) = 69 theta(8) = 74 theta(9) = 74
   |   theta(10) = 74 theta(11) = 73 theta(12) = 73 theta(13) = 73
   |   theta(14) = 73 theta(15) = 73 theta(16) = 73 theta(17) = 72
   |   theta(18) = 72 theta(19) = 72 theta(20) = 72 theta(21) = 72
   |   theta(22) = 72 theta(23) = 72 theta(24) = 71 theta(25) = 71
   |   theta(26) = 71 theta(27) = 71 theta(28) = 71 theta(29) = 71
   |   theta(30) = 71 theta(31) = 71 theta(32) = 71 theta(33) = 70
   |   theta(34) = 70 theta(35) = 70 theta(36) = 70 theta(37) = 70
   |   theta(38) = 70 theta(39) = 70 theta(40) = 70 theta(41) = 66
   |   theta(42) = 65 theta(43) = 67 theta(44) = 67 theta(45) = 65
   |   theta(46) = 67 theta(47) = 66 theta(48) = 67 theta(49) = 67
   |   theta(50) = 67 theta(51) = 67 theta(52) = 68 theta(53) = 68
   |   theta(54) = 68 theta(55) = 68 theta(56) = 68 theta(57) = 68
   |   theta(58) = 68 theta(59) = 68 theta(60) = 68 theta(61) = 68
   |   theta(62) = 68 theta(63) = 68 theta(64) = 68 theta(65) = 68
   |   theta(66) = 68 theta(67) = 68 theta(68) = 68 theta(69) = 68
   |   theta(70) = 68 theta(71) = 68 theta(72) = 67 theta(73) = 67
   |   theta(74) = 67 theta(75) = 67 theta(76) = 67 theta(77) = 67
   |   theta(78) = 67 theta(79) = 67 theta(80) = 67 theta(81) = 67
   |   theta(82) = 67 theta(83) = 67 theta(84) = 67 theta(85) = 67
   |   theta(86) = 67 theta(87) = 67 theta(88) = 67 theta(89) = 67
   |   theta(90) = 67 theta(91) = 67 theta(92) = 67 theta(93) = 67
   |   theta(94) = 67 theta(95) = 67 theta(96) = 67 theta(97) = 67
   |   theta(98) = 67 theta(99) = 67 theta(100) = 67
4  |   theta = 0.01 * theta thetaright = 47.5 thetaleft = 66.5
5  |   para cada i = 1 : 100 faça
6  |   |   Theta(i) = (theta(i) - thetaright) / (thetaright - thetaleft)
7  |   |   m = 0.69234
8  |   |   para cada i = 1 : 7 faça
9  |   |   |   m1(1) = m2 m1(2) = m1.5 m1(3) = m1.4 m1(4) = m1.1 m1(5) = m0.9
   |   |   |   m1(6) = m0.7 m1(7) = m0.3
10 |   |   para cada i = 1 : 12 faça
   |   |   |   n(1) = 1 / (1 - m) n(2) = 1 / (1 - m1.02) n(3) = 1 / (1 - m1.5)
   |   |   |   n(4) = 1 / (1 - m1.6) n(5) = 1 / (1 - m1.7) n(6) = 1 / (1 - m1.8)
   |   |   |   n(7) = 1 / (1 - m1.9) n(8) = 1 / (1 - m2) n(9) = 1 / (1 - m2.5)
   |   |   |   n(10) = 1 / (1 - m5) n(11) = 1 / (1 - m10) n(12) = 1 / (1 - m100)
12 |   |   alpha = 51000 para cada i = 1 : 10 faça
   |   |   |   para cada i1 = 1 : 7 faça
   |   |   |   |   para cada i2 = 1 : 12 faça
   |   |   |   |   |   b5(i) = Theta(i) a5 = 0 h5(i) = (b5(i) - a5) / 100
   |   |   |   |   |   |   xI0(i, i1, i2) = (a5(1/m1(i1)) / (1 - a5(1/m1(i1))))(1/n(i2)) + ...
   |   |   |   |   |   |   (b5(i)(1/m1(i1)) / (1 - b5(i)(1/m1(i1))))(1/n(i2))
16 |   |   |   |   |   |   xI0 = real(xI0)

```

```

1  para cada i = 1 : 10 faça
2  |  para cada j1 = 1 : 7 faça
3  |  |  para cada j2 = 1 : 12 faça
4  |  |  |  soma1(i, j1, j2) = 0 soma2(i, j1, j2) = 0
5  para cada i = 1 : 10 faça
6  |  para cada j1 = 1 : 7 faça
7  |  |  para cada j2 = 1 : 12 faça
8  |  |  |  para cada j = 1 : 100 faça
9  |  |  |  |  x(i, j) = a5 + j * h5(i) if mod(j, 2) == 0 x(i, j) = 1
10 |  |  |  |  soma1(i, j1, j2) = soma1(i, j1, j2) + ((x(i, j))^(1/(m1(j1)))) / (1 -
11 |  |  |  |  x(i, j)^(1/(m1(j1))))^(1/(n(j2)))) else if mod(j, 2) == 0 x(i, j) = 1
12 |  |  |  |  soma2(i, j1, j2) = soma2(i, j1, j2) + (x(i, j)^(1/m1(j1))) /
13 |  |  |  |  (1 - x(i, j)^(1/(m1(j1))))^(1/n(j2))
14 |  |  |  |  XI(i, j1, j2) =
15 |  |  |  |  h5(i) * (xI0(i) + 2 * soma2(i, j1, j2) + 4 * soma1(i, j1, j2)) / 3
16 XI = real(XI)
17 b51 = 0.5 a51 = 0 h51 = (b51 - a51) / 10
18 para cada i = 1 : 7 faça
19 |  para cada j = 1 : 12 faça
20 |  |  if (1 - b51^(1/m1(i))) xI05(i, j) = a51^(1/m1(i)) / (1 -
21 |  |  a51^(1/m1(i)))^(1/n(j)) + b51^(1/m1(i)) / (1 - b51^(1/m1(i)))^(1/n(j))
22 xI05 = real(xI05)
23 para cada i = 1 : 10 faça
24 |  xI11(i) = 0 xI21(i) = 0
25 para cada i1 = 1 : 7 faça
26 |  para cada i2 = 1 : 12 faça
27 |  |  somapar(i1, i2) = 0 somaimpar(i1, i2) = 0
28 para cada i1 = 1 : 7 faça
29 |  para cada i2 = 1 : 12 faça
30 |  |  para cada i = 1 : 10 faça
31 |  |  |  x5(i) = a51 + i * h51 if mod(i, 2) == 0 x5(i) =
32 |  |  |  1 somapar(i1, i2) = somapar(i1, i2) + x5(i)^(1/m1(i1)) / (1 -
33 |  |  |  x5(i)^(1/m1(i1)))^(1/n(i2)) else if mod(i, 2) == 0 x5(i) =
34 |  |  |  1 somaimpar(i1, i2) = somaimpar(i1, i2) + x5(i)^(1/m1(i1)) / (1 -
35 |  |  |  x5(i)^(1/m1(i1)))^(1/n(i2))
36 |  |  |  integral f(i1, i2) = h51 * (xI05(i1, i2) + 2 *
37 |  |  |  somaimpar(i1, i2) + 4 * somapar(i1, i2)) / 3
38 integral f = real(integral f) XI = real(XI)
39 para cada i = 1 : 10 faça
40 |  para cada i1 = 1 : 7 faça
41 |  |  para cada i2 = 1 : 12 faça
42 |  |  |  if Theta(i) = 0 XI(i, i1) = 0 integral f(i1, i2) = 0
43 |  |  |  k(i, i1, i2) = (Theta(i)^0.5 * XI(i, i1)) / (integral f(i1, i2))

```

```

1 para cada i = 1 : 10 faça
2   para cada i1 = 1 : 7 faça
3     para cada i2 = 1 : 12 faça
4       h(i, i1, i2) = (1/(alpha)) * ((1/(Theta(i)^(1/m1(i1)))) - 1)^(1/n(i2))
5 h = real(h) para cada i = 1 : 10 faça
6   para cada i1 = 1 : 7 faça
7     para cada i2 = 1 : 12 faça
8       cond_hidrau_rel(i, i1, i2) =
          (1 - ((alpha * h(i))^(n(i2)-1)) * (1 + (alpha *
          h(i)^(n(i2)))^(-m1(i1)))^(2) / ((1 + (alpha * h(i)^(n(i2)))^(m1(i1)/2))
9 cond_hidrau_rel = real(cond_hidrau_rel)
10 para cada i = 1 : 10 faça
11   para cada i1 = 1 : 7 faça
12     para cada i2 = 1 : 12 faça
13       ks(i, i1, i2) = k(i) / cond_hidrau_rel(i, i1, i2)
14 para cada i = 1 : 10 faça
15   para cada i1 = 1 : 7 faça
16     para cada i2 = 1 : 12 faça
17       ksnormalizado(i, i1, i2) =
          real(ks(i, i1, i2)) + imag(ks(i, i1, i2))
18 para cada i = 1 : 10 faça
19   d(i) = (1 - m) * cond_hidrau_rel(i) / (alpha * m * (thetaright -
          thetaleft)) * (Theta(i)^(0.5-1/m)) * (((1 - Theta(i)^(1/m)))^(-m) + (1 -
          Theta(i)^(1/m)))^m - 2)
20 d = real(d) a1 = 0 b1 = 5 n = 50 h1 = (b1 - a1) / n
21 para cada i = 1 : 10 faça
22   x13(i) = a1 + (i - 1) * h1
23 plot(x, ksnormalizado(:, 1, 1))
24

```

Algoritmo .6:

```

1  m=0.65
2  para cada  $i = 1 : 100$  faça
3  |    $\theta(1) = 42$   $\theta(2) = 58$   $\theta(3) = 58$   $\theta(4) = 58$ 
   |    $\theta(5) = 58$   $\theta(6) = 58$   $\theta(7) = 69$   $\theta(8) = 74$ 
   |    $\theta(9) = 74$   $\theta(10) = 74$   $\theta(11) = 73$   $\theta(12) = 73$ 
   |    $\theta(13) = 73$   $\theta(14) = 73$   $\theta(15) = 73$   $\theta(16) = 73$ 
   |    $\theta(17) = 72$   $\theta(18) = 72$   $\theta(19) = 72$   $\theta(20) = 72$ 
   |    $\theta(21) = 72$   $\theta(22) = 72$   $\theta(23) = 72$   $\theta(24) = 71$ 
   |    $\theta(25) = 71$   $\theta(26) = 71$   $\theta(27) = 71$   $\theta(28) = 71$ 
   |    $\theta(29) = 71$   $\theta(30) = 71$   $\theta(31) = 71$   $\theta(32) = 71$ 
   |    $\theta(33) = 70$   $\theta(34) = 70$   $\theta(35) = 70$   $\theta(36) = 70$ 
   |    $\theta(37) = 70$   $\theta(38) = 70$   $\theta(39) = 70$   $\theta(40) = 70$ 
   |    $\theta(41) = 66$   $\theta(42) = 65$   $\theta(43) = 67$   $\theta(44) = 67$ 
   |    $\theta(45) = 65$   $\theta(46) = 67$   $\theta(47) = 66$   $\theta(48) = 67$ 
   |    $\theta(49) = 67$   $\theta(50) = 67$   $\theta(51) = 67$   $\theta(52) = 68$ 
   |    $\theta(53) = 68$   $\theta(54) = 68$   $\theta(55) = 68$   $\theta(56) = 68$ 
   |    $\theta(57) = 68$   $\theta(58) = 68$   $\theta(59) = 68$   $\theta(60) = 68$ 
   |    $\theta(61) = 68$   $\theta(62) = 68$   $\theta(63) = 68$   $\theta(64) = 68$ 
   |    $\theta(65) = 68$   $\theta(66) = 68$   $\theta(67) = 68$   $\theta(68) = 68$ 
   |    $\theta(69) = 68$   $\theta(70) = 68$   $\theta(71) = 68$   $\theta(72) = 67$ 
   |    $\theta(73) = 67$   $\theta(74) = 67$   $\theta(75) = 67$   $\theta(76) = 67$ 
   |    $\theta(77) = 67$   $\theta(78) = 67$   $\theta(79) = 67$   $\theta(80) = 67$ 
   |    $\theta(81) = 67$   $\theta(82) = 67$   $\theta(83) = 67$   $\theta(84) = 67$ 
   |    $\theta(85) = 67$   $\theta(86) = 67$   $\theta(87) = 67$   $\theta(88) = 67$ 
   |    $\theta(89) = 67$   $\theta(90) = 67$   $\theta(91) = 67$   $\theta(92) = 67$ 
   |    $\theta(93) = 67$   $\theta(94) = 67$   $\theta(95) = 67$   $\theta(96) = 67$ 
   |    $\theta(97) = 67$   $\theta(98) = 67$   $\theta(99) = 67$   $\theta(100) = 67$ 
4  |    $\theta = 0.01 * \theta$   $\theta_{right} = 47.5$   $\theta_{left} = 66.5$ 
5  |   para cada  $i = 1 : 100$  faça
6  |   |    $\Theta(i) = (\theta(i) - \theta_{right}) / (\theta_{right} - \theta_{left})$ 
7  |   |    $m = 0.69234$   $n = 1 / (1 - m)$   $\alpha = 5100$ 
8  |   |   para cada  $i = 1 : 100$  faça
9  |   |   |    $h(i) = 1 / (\alpha * (1 / (\Theta(i)^{(1/m)}) - 1)^{(1/n)})$ 
10 |   |   para cada  $i = 1 : 100$  faça
11 |   |   |    $a(i) = 0$ 
12 |   |   para cada  $i = 1 : 100$  faça
13 |   |   |    $b(i) = \Theta(i)$   $passo(i) = (b(i) - a(i)) / 100$ 
14 |   |   para cada  $i = 1 : 100$  faça
15 |   |   |    $somapar = 0$   $somaimpar = 0$   $soma0(i) = 1 / (b(i)^2)$  para cada
   |   |   |    $j = 1 : 100$  faça
16 |   |   |   |    $x(i, j) = a(i) + j * passo(i)$ 
17 |   |   |   |    $if \text{mod}(j, 2) == 0$   $somapar = somapar + 1 / (x(i, j)^2)$  else
   |   |   |   |    $somaimpar = somaimpar + 1 / (x(i, j)^2)$   $integral1(i) =$ 
   |   |   |   |    $passo(i) * (soma0(i) + 2 * somaimpar + 4 * somapar) / 3$ 
18 |   |    $a1 = 0$   $b1 = 1$ 
19

```

```

1 passoconst = (b1 - a1)/100 somapar = 0 somaimpar = 0 somaconst0 = 1/(b12)
2 para cada i = 1 : 100 faça
3   if mod(i,2) == 0 somapar = somapar + 1/(x(i,j)2) else
   somaimpar = somaimpar + 1/(x(i,j)2) integralconst1 =
   passoconst * (somaconst0 + 2 * somaimpar + 4 * somapar)/3
   para cada i = 1 : 100 faça
4   └─ condu1(i) = Theta(i)2 * integral1(i)/integralconst1

```

Algoritmo .7:

```

1 thetar = 0.42 thetas = 0.50 n = 2.0 m = 0.5 alpha = 0.005
2 a = 0 b = 0.80 n = 100 h = (b - a)/n
3 para cada i = 1 : n faça
4   └─ theta(i) = 0.25 + (i - 1) * h
5 para cada i = 1 : n faça
6   └─ h(i) = 1/alpha * ((thetas - thetar)/(theta(i) - thetar)(1/m) - 1)(1/n)
7 plot(theta,h,'Color','g')

```

Algoritmo .8:

```

1   $n(1) = 3$   $n(2) = 3.5$   $n(3) = 3.8$   $n(4) = 4.0$   $n(5) = 4.5$   $m(1,1) = 1.7 - 1/n(1)$ 
2   $m(1,2) = 1.7 - 1/n(2)$   $m(1,3) = 1.7 - 1/n(3)$   $m(1,4) = 1.7 - 1/n(4)$ 
3   $m(2,1) = 1.9 - 1/n(1)$   $m(2,2) = 1.9 - 1/n(2)$   $m(2,3) = 1.9 - 1/n(3)$ 
4   $m(2,4) = 1.9 - 1/n(4)$   $m(3,1) = 2.0 - 1/n(1)$   $m(3,2) = 2.0 - 1/n(2)$ 
5   $m(3,3) = 2.0 - 1/n(3)$   $m(3,4) = 2.0 - 1/n(4)$   $m(4,1) = 2.5 - 1/n(1)$ 
6   $m(4,2) = 2.5 - 1/n(2)$   $m(4,3) = 2.5 - 1/n(3)$   $m(4,4) = 2.5 - 1/n(4)$ 
7   $a = 0$   $bauxiliar = 0.6$   $n1 = 100$   $hauxiliar = (bauxiliar - a)/n1$ 
8  para cada  $i = 1 : 100$  faça
9  ┌  $theta(i) = a + (i - 1) * hauxiliar$ 
10 para cada  $ii1 = 1 : 4$  faça
11 ┌ para cada  $ii2 = 1 : 4$  faça
12 ┌ ┌ para cada  $ii = 1 : 5$  faça
13 ┌ ┌ ┌ para cada  $i = 1 : n1$  faça
14 ┌ ┌ ┌ ┌  $h(i, ii1, ii2, ii) = (theta(i)^{(1/m(ii1, ii2))} - a)/n(ii)$ 
15 para cada  $ii1 = 1 : 4$  faça
16 ┌ para cada  $ii2 = 1 : 4$  faça
17 ┌ ┌ para cada  $ii = 1 : 5$  faça
18 ┌ ┌ ┌ para cada  $i = 1 : n1$  faça
19 ┌ ┌ ┌ ┌  $x(i) = a + (i - 1) * h(i, ii1, ii2, ii)$ 
20 para cada  $i = 1 : 5$  faça
21 ┌ para cada  $j = 1 : 4$  faça
22 ┌ ┌ para cada  $j1 = 1 : 4$  faça
23 ┌ ┌ ┌  $soma(i, j, j1) = 0$ 
24 para cada  $i1 = 1 : 5$  faça
25 ┌ para cada  $i2 = 1 : 4$  faça
26 ┌ ┌ para cada  $i3 = 1 : 4$  faça
27 ┌ ┌ ┌ para cada  $i = 2 : n1$  faça
28 ┌ ┌ ┌ ┌ para cada  $j = 2 : n1$  faça
29 ┌ ┌ ┌ ┌ ┌  $soma(i1, i2, i3) = soma(i1, i2, i3) + m(i2, i3) * h(i)/2 * (x(j - 1))^{(m(i2, i3) - 1 + 1/n(i1))} * (1 - x(j - 1))^{(-1/n(i1))} + x(j)^{(m(i2, i3) - 1 + 1/n(i1))} * (1 - x(j))^{(-1/n(i1))}$ 
┌ ┌ ┌ ┌ ┌  $f(i, i1, i2, i3) = soma(i1, i2, i3)$ 
30 Gráficos
31  $subplot(2, 1, 1)$   $plot(theta, f(:, [1 : 4], 1, 1))$ 
32  $subplot(2, 1, 2)$   $plot(theta, f(:, [1 : 4], 2, 2))$ 
33  $subplot(2, 1, 1)$   $plot(theta, f(:, [1 : 4], 3, 3))$ 
34  $subplot(2, 1, 2)$   $plot(theta, f(:, [1 : 4], 4, 4))$ 

```

Algoritmo .9:

```

1   $a = 0$   $b = 0.6$   $n1 = 100$   $h = (b - a)/n1$   $n = 1.9$   $m = 1 - 1/n$   $n11 = 1.5$   $m11 = 1 - 1/n11$ 
2  para cada  $i = 1 : n1$  faça
3  |    $theta(i) = a + (i - 1) * h$ 
4  para cada  $i = 1 : n1$  faça
5  |    $k(i) = theta(i)^{(0.5)} * (1 - (1 - theta(i)^{(1/m)})^m)^{(2)}$ 
6  para cada  $i = 1 : n1$  faça
7  |    $k1(i) = theta(i)^{(0.5)} * (1 - (1 - theta(i)^{(1/m11)})^{m11})^2$ 
8   $plot(theta, k, theta, k1)$ 

```

Algoritmo .10:

```

1   $a = -1$   $b = -100$   $n = 990$   $h = (b - a)/n$   $alpha = 0.050$   $n11 = 0.10$   $m11 = 1 - 1/n11$ 
2  para cada  $i = 1 : n$  faça
3  |    $h1(i) = a + (i - 1) * h$ 
4  para cada  $i = 1 : n$  faça
5  |    $k(i) = (1 - (alpha * h1(i))^{(m11-1)} * (1 + (alpha * h1(i))^{(n11)}))^{(-m11)} / (1 + (alpha * h1(i))^{(n11)})^{(m11/2)}$ 
6   $k = real(k)$ 
7   $plot(h1, k, 'Color', 'g')$ 

```

Algoritmo .11:

```

1   $a = 0$   $b = 0.6$   $n = 1000$   $h = (b - a)/n$   $n11 = 2$   $m11 = 1 - 1/n11$   $alpha = 0.005$ 
2  para cada  $i = 1 : n$  faça
3  |    $theta(i) = a + (i) * h$ 
4   $thetas = 0.50$   $thetar = 0.10$  para cada  $i = 1 : n$  faça
5  |    $h1(i) = 1/alpha * (((thetas - thetar)/(theta(i) - thetar))^{(1/m11)} - 1)^{(1/n11)}$ 
6  para cada  $i = 1 : n$  faça
7  |    $if i == 1$   $dh1dtheta(i) = (h1(i+1) - h1(i))/theta(i)$   $elseif i == n$ 
   |    $dh1dtheta(i) = (h1(i) - h1(i-1))/theta(i)$   $else$ 
   |    $dh1dtheta(i) = (h1(i+1) - h1(i-1))/theta(i)$ 
8   $plot(theta, dh1dtheta, 'Color', 'r')$ 

```

Algoritmo .12:

```

1   $a = 0$   $b = 0.6$   $n = 100$   $h = (b - a)/n$   $n11 = 2.0$   $m11 = 1 - 1/n11$ 
2   $alpha = 0.005$   $thetar = 0.10$   $thetas = 0.50$ 
3  para cada  $i = 1 : n$  faça
4  ┌  $theta(i) = a + (i - 1) * h$ 
5  para cada  $i = 1 : n$  faça
6  ┌  $D(i) = ((1 - m11) * 100)/(alpha * m11 * (thetas - thetar)) *$ 
   ┌  $theta(i)^{(1/2 - 1/m11)} * ((1 - theta(i)^{(1/m11)})^{-m11} + (1 -$ 
   ┌  $theta(i)^{m11})^{m11} - 2)$ 
7   $D = real(D)$ 
8   $plot(theta, D)$ 

```

Algoritmo .13:

```

1   $a = 0$   $b = 0.5$   $n = 100$   $h = (b - a)/n$   $n11 = 2.0$   $m11 = 2 - 1/n11$   $alpha = 0.005$   $thetar = 0$ 
2  para cada  $i = 1 : n$  faça
3  ┌  $theta(i) = a + (i - 1) * h$ 
4  para cada  $i = 1 : n$  faça
5  ┌  $k(i) = theta(i)^{0.5} * (1 - m11 * (1 - theta(i)^{(1/m11)})^{m11 - 1} + (m11 -$ 
   ┌  $1) * (1 - theta(i)^{(1/m11)})^{m11})^2$ 
6   $plot(theta, k)$ 

```

Algoritmo .14:

```

1  a = 0 b = 4 n = 100 h = (b - a)/n
2  i = 1 : 4 t(i) = a + i * h
3  i = 1 : 3 d10A = 0,093 d50A = 0,215 d60A = 0,247
4  granulometriaA = [d10Ad50Ad60A] i = 1 : 3 d10B = 0,089
   d50B = 0,221 d60B = 0,268 granulometriaB = [d10Bd50Bd60B]
   i = 1 : 3 d10C = 0,094 d50C = 0,212 d60C = 0,245
   granulometriaC = [d10Cd50Cd60C]
5  i = 1 : 3 d10D = 0,098 d50D = 0,225 d60D = 0,273
   granulometriaD = [d10Dd50Dd60D]
   ks1Aformula1 = 8.91 + 61.08 * granulometriaA(1)
6  ks1Bformula1 = 8.91 + 61.08 * granulometriaB(1)
7  ks1Cformula1 = 8.91 + 61.08 * granulometriaC(1)
8  ks1Dformula1 = 8.91 + 61.08 * granulometriaD(1)
9  ks1amostras =
   [ks1Aformula1, ks1Bformula1, ks1Cformula1, ks1Dformula1]
10 figure(1)
11 plot(t, ks1amostras, 'LineStyle', '--', 'Marker', 'o')
12 title('Cálculo da condutividade hidráulica
13 apartir da granulometria', 'Color', 'b')
14 legend('Equação 1')
15 xlabel('Granulometria dos solos em mm', 'Color', 'm')
16 ylabel('Perfil da condutividade hidráulica, m/dia', 'Color', 'm')
17 ks2Aformula2 = 16.88 + 10.60 * granulometriaA(2)
18 ks2Bformula2 = 16.88 + 10.60 * granulometriaB(2)
19 ks2Cformula2 = 16.88 + 10.60 * granulometriaC(2)
20 ks2Dformula2 = 16.88 + 10.60 * granulometriaD(2)
21 ks2amostras =
   [ks2Aformula2, ks2Bformula2, ks2Cformula2, ks2Dformula2]
22 figure(2)
23 plot(t, ks2amostras, 'LineStyle', '--', 'Marker', 'o')
24 title('Cálculo da condutividade hidráulica
25 apartir da granulometria', 'Color', 'b')
26 legend('Equação 2')
27 xlabel('Granulometria dos solos em mm', 'Color', 'm')
28 ylabel('Perfil da condutividade hidráulica, m/dia', 'Color', 'm')
29 ks3Aformula3 = 16.55 + 8.32 * granulometriaA(3)
30 ks3Bformula3 = 16.55 + 8.32 * granulometriaB(3)
31 ks3Cformula3 = 16.55 + 8.32 * granulometriaC(3)
32 ks3Dformula3 = 16.55 + 8.32 * granulometriaD(3)
33 ks3amostras =
   [ks3Aformula3, ks3Bformula3, ks3Cformula3, ks3Dformula3]
34 figure(3)
35 plot(t, ks3amostras, 'LineStyle', '--', 'Marker', 'o')
36 title('Cálculo da condutividade hidráulica
37 apartir da granulometria', 'Color', 'b')
38 legend('Equação 3')
39 xlabel('Granulometria dos solos em mm', 'Color', 'm')
40 ylabel('Perfil da condutividade hidráulica, m/dia', 'Color', 'm')
41

```

```

1 ks4Aformula4 = 16.16 + 121.5 * granulometriaA(1)2
2 ks4Bformula4 = 16.16 + 121.5 * granulometriaB(1)2
3 ks4Cformula4 = 16.16 + 121.5 * granulometriaC(1)2
4 ks4Dformula4 = 16.16 + 121.5 * granulometriaD(1)2
5 ks4amostras =
   [ks4Aformula4ks4Bformula4ks4Cformula4ks4Dformula4]
6 figure(4)
7 plot(t,ks4amostras,'LineStyle','--','Marker','o')
8 title'Cálculodacondutividadehidráulica
9 apartirdagranulometria','Color','b'
10 legend('Equação4')
11 xlabel('Granulometriadosoloemmm','Color','m')
12 ylabel('Perfildacondutividadehidráulica,m/dia','Color','m')
   ks5Aformula5 = 20.90 + 6.52 * granulometriaA(2)2
13 ks5Bformula5 = 20.90 + 6.52 * granulometriaB(2)2
14 ks5Cformula5 = 20.90 + 6.52 * granulometriaC(2)2
15 ks5Dformula5 = 20.90 + 6.52 * granulometriaD(2)2
16 ks5amostras =
17 [ks5Aformula5ks5Bformula5ks5Cformula5ks5Dformula5]
18 figure(5)
19 plot(t,ks5amostras,'LineStyle','--','Marker','o')
20 title'Cálculodacondutividadehidráulica
21 apartirdagranulometria','Color','b'
22 legend('Equação5')
23 xlabel('Granulometriadosoloemmm','Color','m')
24 ylabel('Perfildacondutividadehidráulica,m/dia','Color','m')
   ks6Aformula6 = 20.79 + 3.84 * granulometriaA(3)2
25 ks6Bformula6 = 20.79 + 3.84 * granulometriaB(3)2
26 ks6Cformula6 = 20.79 + 3.84 * granulometriaC(3)2
27 ks6Dformula6 = 20.79 + 3.84 * granulometriaD(3)2
28 ks6amostras =
29 [ks6Aformula6ks6Bformula6ks6Cformula6ks6Dformula6]
30 figure(6)
31 plot(t,ks6amostras,'LineStyle','--','Marker','o')
32 title'Cálculodacondutividadehidráulica
33 apartirdagranulometria','Color','b'
34 legend('Equação6')
35 xlabel('Granulometriadosoloemmm','Color','m')
36 ylabel('Perfildacondutividadehidráulica,m/dia','Color','m')

```

```

1 ks7Aformula7 = 10.14 + 114.67 * granulometriaA(1) - (...)
2 20.93 * granulometriaA(2)
3 ks7Bformula7 = 10.14 + 114.67 * granulometriaB(1) - (...)
4 20.93 * granulometriaB(2)
5 ks7Cformula7 = 10.14 + 114.67 * granulometriaC(1) - (...)
6 20.93 * granulometriaC(2)
7 ks7Dformula7 = 10.14 + 114.67 * granulometriaD(1) - (...)
8 20.93 * granulometriaD(2)
9 ks7amostras =
10 [ks7Aformula7ks7Bformula7ks7Cformula7ks7Dformula7]
11 figure(7)
12 plot(t,ks7amostras,'LineStyle','--','Marker','o')
13 title'Cálculo da condutividade hidráulica
14 apartir da granulometria','Color','b'
15 legend('Equação7')
16 xlabel('Granulometria dosolo emmm','Color','m')
17 ylabel('Perfil da condutividade hidráulica, m/dia','Color','m')
18 ks8Aformula8 = 9.8 + 116.39 * granulometriaA(1) - (...)
19 15.92 * granulometriaA(3)
20 ks8Bformula8 = 9.8 + 116.39 * granulometriaB(1) - (...)
21 15.92 * granulometriaB(3)
22 ks8Cformula8 = 9.8 + 116.39 * granulometriaC(1) - (...)
23 15.92 * granulometriaC(3)
24 ks8Dformula8 = 9.8 + 116.39 * granulometriaD(1) - (...)
25 15.92 * granulometriaD(3)
26 ks8amostras =
27 [ks8Aformula8ks8Bformula8ks8Cformula8ks8Dformula8]
28 figure(8)
29 plot(t,ks8amostras,'LineStyle','--','Marker','o')
30 title'Cálculo da condutividade hidráulica
31 apartir da granulometria','Color','b'
32 legend('Equação8')
33 xlabel('Granulometria dosolo emmm','Color','m')
34 ylabel('Perfil da condutividade hidráulica, m/dia','Color','m')
```
