

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE CONSTRUÇÃO CIVIL  
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

**BRUNA CAROLINE DE QUADROS  
THIERS PONTES FRANCO NETO**

**ESTIMATIVA DA TAXA DE INFILTRAÇÃO EM SOLO ARGILOSO,  
SOB DIFERENTES CONDIÇÕES DE UMIDADE**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**PATO BRANCO  
2018**

BRUNA CAROLINE DE QUADROS

THIERS PONTES FRANCO NETO

**ESTIMATIVA DA TAXA DE INFILTRAÇÃO EM SOLO ARGILOSO,  
SOB DIFERENTES CONDIÇÕES DE UMIDADE**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado como requisito parcial à  
obtenção do título Bacharel em Engenharia  
Civil da Universidade Tecnológica Federal  
do Paraná, Câmpus Pato Branco.

Orientador: Prof. Dr. Murilo Cesar Lucas.

**PATO BRANCO**

**2018**

## **TERMO DE APROVAÇÃO**

### **ESTIMATIVA DA TAXA DE INFILTRAÇÃO EM SOLO ARGILOSO, SOB DIFERENTES CONDIÇÕES DE UMIDADE**

**BRUNA CAROLINE DE QUADROS**

**E**

**THIERS PONTES FRANCO NETO**

No dia 20 de junho de 2018, as 10h20min, na SALA DE TREINAMENTO da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, este trabalho de conclusão de curso foi julgado e, após arguição pelos membros da Comissão Examinadora abaixo identificados, foi aprovado como requisito parcial a obtenção do grau de Bacharem em Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná- UTFPR, conforme Ata de Defesa Pública nº16-TCC/2018.

Orientador: PROD. DR. MURILO CESAR LUCAS (DACOC/UTFPR-PB)

Membro 1 da Banca: Prof. Dr. NEY LYZANDRO TABALIPA (DACOC/UTFPR-PB)

Membro 2 da Banca: Prof. Dr. CESAR AUGUSTO M. DESTRO (DACOC/UTFPR-PB)

## **AGRADECIMENTOS**

Agradecemos à nossa família pelo íntegro apoio e suporte durante esses anos de faculdade.

Ao professor orientador Prof. Murilo Cesar Lucas, pelo incentivo e constante contribuição para realização deste trabalho.

Por fim, agradecemos aos amigos que nos auxiliaram e apoiaram no decorrer do nosso caminho, que de alguma forma contribuíram para o nosso desenvolvimento e por tonarem essa trajetória mais leve.

## RESUMO

QUADROS, Bruna C.; NETO, Thiers. P.F. **Estimativa da taxa de infiltração em solo argiloso, sob diferentes condições de umidade**. 2015, 80 pág. Trabalho de Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Civil- Departamento Acadêmico de Construção Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná- UTFPR. Pato Branco, 2015.

O conhecimento do processo de infiltração da água no solo possui grande importância para diversas áreas da engenharia, sendo o modelo de Green-Ampt-Mein-Larson (GAML) um dos mais utilizados para se encontrar a taxa de infiltração. Este modelo é relevante, mas o ajuste correto dos seus parâmetros é um fator expressivo na obtenção dos seus resultados, podendo não representar a situação real encontrada em campo. Desta forma, este trabalho teve como objetivo determinar a taxa de infiltração da água em campo de um solo exposto com alto teor de argila, sob diferentes condições de umidade e comparar os valores da taxa de infiltração obtidos em campo com o modelo matemático de GAML, obtendo por fim uma curva teórica de infiltração ajustada com o melhor valor estimado de condutividade hidráulica. Os ensaios foram realizados em Pato Branco – PR, com o uso do infiltrômetro de anéis concêntricos em 8 pontos amostrais. O parâmetro da condutividade hidráulica ( $K_0$ ) utilizado no modelo de GAML é a taxa de infiltração estável ( $T_{ie}$ ) encontrada nos ensaios de campo. Com a subtração entre a porosidade do solo ( $n$ ) do teor de umidade ( $\theta$ ) encontrou-se a umidade ( $\Delta\theta$ ) durante o ensaio ( $\theta_r$ ). Para a obtenção do potencial mátrico do solo ( $\Psi$ ) utilizou-se o modelo analítico de van Genuchten (1980) que é amplamente empregado. Para realizar a análise estatística dos erros encontrados pela taxa de infiltração teórica em comparação com a taxa de infiltração obtida em campo, fez-se uso de três modelos estatísticos: RMSE – Root Mean Squared Error (raiz do erro quadrático médio), BIAS (Viés) e MAE – Mean Absolute Error (erro absoluto médio). De acordo com os resultados do BIAS, nota-se uma superestimativa dos valores da taxa de infiltração obtida pelo modelo GAML em quase todos os ensaios realizados (exceto os ensaios 2 e 7). A utilização da condutividade hidráulica ajustada ( $K_0$ ) melhor se ajustam a equação de GAML aos diferentes teores de umidade do solo encontrados, demonstrando a importância de estudo

**Palavras-chaves:** Taxa de infiltração; Gree-Ampt-Mein-Larson; Umidade; Condutividade hidráulica; Solo argiloso.

## ABSTRACT

QUADROS, Bruna C.; NETO, Thiers. P.F. **Estimation of the infiltration rate in clayey soils, under different humidity conditions.** 2015, 80 pág. Trabalho de Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Civil- Departamento Acadêmico de Construção Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná- UTFPR. Pato Branco, 2015.

The knowledge of soil water infiltration process has great importance for several areas of engineering. The Green-Ampt-Mein-Larson (GAML) model is one of the most used to find the rate of infiltration. The model is relatively simple, but the correct fit of its parameters is a important issue in its results and may not represent the actual situation found in the field. In this way, the aim of this work was to determine the infiltration rate of water in an exposed soil with high clay content, under different water-content conditions and compare the values of the infiltration rate obtained in the field with the mathematical model of GAML. Finally a theoretical infiltration curve adjusted with the best estimated value of hydraulic conductivity was obtained. The tests were carried out in Pato Branco - PR, with the use of the concentric rings infiltrometers at 8 sample points. The parameter of the hydraulic conductivity ( $K_0$ ) used in the GAML model is the stable infiltration rate ( $T_{ie}$ ) found in the field tests. With the subtraction between the soil porosity ( $n$ ) of the water-content ( $\theta$ ) the moisture ( $\Delta\theta$ ) was found during the test. In order to obtain soil matric potential ( $\Psi$ ), the analytical model of van Genuchten (1980) was used, which is a widely used parameter in the GAML equation. In order to obtain the suction head ( $\Psi$ ), the analytical model of van Genuchten (1980) has been used, which is widely applied. To perform the statistical analysis of the errors found by the theoretical infiltration rate compared to the rate of infiltration obtained in the field, three statistical models were used: RMSE – Root Mean Squared Error, BIAS and MAE - Mean Absolute Error. According to the results of the BIAS, there is an overestimation of the values of the infiltration rate obtained by the GAML model in almost all the tests performed (except tests 2 and 7). The use of adjusted hydraulic conductivity ( $K_0$ ) with values close to  $10^{-4}$  (cm / min), best fit the Green-Ampt-Mein-Larson equation to the different water-content of the soil found, forming a curve very close to the values obtained experimentally.

**Keywords:** Infiltration rate; Green-Ampt-Mein-Larson; Water-content; Hydraulic conductivity; Clay soil.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Diagrama triangular de grupamento textural do solo. ....	17
Figura 2- Curva de renteção e textura.....	21
Figura 3- Evolução do perfil de umidade em um solo. ....	22
Figura 4- Anéis concêntricos. ....	24
Figura 5- Curva representativa em função da taxa de infiltração pelo tempo. ....	27
Figura 6- Classes hidráulicas do solo.....	28
Figura 7- Localização da área de estudo ....	31
Figura 8- Anéis concêntricos inseridos no solo. ....	33
Figura 9-Anéis concêntricos e matérias utilizados para inserção.....	34
Figura 10-Anéis concêntricos preenchidos com água.....	35
Figura 11-Anéis de Kopeck com solo contido dentro para a determinação do teor de umidade.....	36
Figura 12-Balão Volumétrico contendo 20g de solo utilizado no ensaio. ....	37
Figura 13-Proveta graduada contendo álcool etílico. ....	38
Figura 14- Curva observada obtida em campo, curva com ajustes na condutividade hidráulica e curva teórica utilizando GAML para o ensaio 1.....	47
Figura 15-Curva observada obtida em campo, curva com ajustes na condutividade hidráulica e curva teórica utilizando GAML para o ensaio 2.....	47
Figura 16-Curva observada obtida em campo, curva com ajustes na condutividade hidráulica e curva teórica utilizando GAML para o ensaio 3.....	48
Figura 17-Curva observada obtida em campo, curva com ajustes na condutividade hidráulica e curva teórica utilizando GAML para o ensaio 4.....	48
Figura 18-Curva observada obtida em campo, curva com ajustes na condutividade hidráulica e curva teórica utilizando GAML para o ensaio 5.....	49
Figura 19-Curva observada obtida em campo, curva com ajustes na condutividade hidráulica e curva teórica utilizando GAML para o ensaio 6.....	49
Figura 20-Curva observada obtida em campo, curva com ajustes na condutividade hidráulica e curva teórica utilizando GAML para o ensaio 7.....	50
Figura 21-Curva observada obtida em campo, curva com ajustes na condutividade hidráulica e curva teórica utilizando GAML para o ensaio 8.....	50

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Valores de permeabilidade do solo .....	19
Tabela 2- Valores do teor de umidade residual.....	29
Tabela 3- Datas da realização dos ensaios de campo.....	32
Tabela 4- Valores dos teores de umidade.....	42
Tabela 5- Frações do solo.....	43
Tabela 6- Massa específica do solo .....	44
Tabela 7- Massa específica dos sólidos.....	44
Tabela 8- Valores obtidos para o potencial mátrico em diferentes condições de umidade .....	45
Tabela 9- Valores encontrados de RMSE, MAE e BIAS .....	51
Tabela 10-Valores obtidos para densidade do solo .....	60
Tabela 11-Valor obtido para densidade dos sólidos.....	60
Tabela 12-Resultado encontrado para porosidade do solo.....	60
Tabela 13- Teor de umidade para o ensaio 1.....	60
Tabela 14-Dados para o potencial mátrico para o ensaio 1 .....	61
Tabela 15-Taxa de infiltração observada para o ensaio 1 .....	61
Tabela 16-Taxa de infiltração teórica para o ensaio 1.....	62
Tabela 17-Taxa de infiltração ajustada para o ensaio 1 .....	62
Tabela 18-Teor de umidade para o ensaio 2 .....	62
Tabela 19-Dados para o potencial mátrico para o ensaio 2 .....	63
Tabela 20-Taxa de infiltração observada para o ensaio 2.....	63
Tabela 21-Taxa de infiltração teórica para o ensaio 2.....	64
Tabela 22-Taxa de infiltração ajustada para o ensaio 2 .....	64
Tabela 23-Teor de umidade para o ensaio 3 .....	65
Tabela 24-Dados para o potencial mátrico para o ensaio 3 .....	65
Tabela 25-Taxa de infiltração observada para o ensaio 3.....	66
Tabela 26-Taxa de infiltração teórica para o ensaio 3.....	66
Tabela 27-Taxa de infiltração ajustada para o ensaio 3.....	67
Tabela 28-Teor de umidade para o ensaio 4 .....	67
Tabela 29-Dados para o potencial mátrico para o ensaio 4 .....	67
Tabela 30- Taxa de infiltração observada para o ensaio 4.....	68



Tabela 31-Taxa de infiltração teórica para o ensaio 4.....	68
Tabela 32- Taxa de infiltração ajustada para o ensaio 4 .....	69
Tabela 33- Teor de umidade para o ensaio 5 .....	69
Tabela 34- Dados para o potencial mátrico para o ensaio 5 .....	70
Tabela 35- Taxa de infiltração observada para o ensaio 5.....	70
Tabela 36- Taxa de infiltração teórica para o ensaio 5.....	71
Tabela 37- Taxa de infiltração ajustada para o ensaio 5.....	71
Tabela 38- Teor de umidade para o ensaio 6.....	71
Tabela 39- Dados para o potencial mátrico para o ensaio 6 .....	72
Tabela 40- Taxa de infiltração observada para o ensaio 6.....	72
Tabela 41- Taxa de infiltração teórica para o ensaio 6.....	73
Tabela 42- Taxa de infiltração ajustada para o ensaio 6.....	73
Tabela 43- Teor de umidade para o ensaio 7.....	73
Tabela 44- Dados para o potencial mátrico para o ensaio 7 .....	74
Tabela 45- Taxa de infiltração observada para o ensaio 7.....	74
Tabela 46- Taxa de infiltração teórica para o ensaio 7.....	75
Tabela 47- Taxa de infiltração ajustada para o ensaio 7.....	75
Tabela 48- Teor de umidade para o ensaio 8.....	75
Tabela 49- Dados para o potencial mátrico para o ensaio 8 .....	76
Tabela 50- Taxa de infiltração observada para o ensaio 8.....	76
Tabela 51- Taxa de infiltração teórica para o ensaio 8.....	77
Tabela 52- Taxa de infiltração ajustada para o ensaio 8.....	77

# SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>12</b>
<b>2 OBJETIVOS</b> .....	<b>15</b>
2.1 OBJETIVO GERAL .....	15
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	15
<b>3 REFERÊNCIAS TEÓRICO</b> .....	<b>16</b>
3.1 TEXTURA DO SOLO .....	16
3.1.1 Porosidade do solo .....	17
3.1.2 Permeabilidade do solo .....	18
3.2 DINÂMICA DA ÁGUA NO SOLO .....	19
3.2.1 Umidade do solo .....	19
3.2.2 Curva de retenção de água no solo .....	20
3.2.3 Infiltração .....	21
3.2.4 Capacidade de infiltração e taxa de infiltração .....	22
3.2.5 Método de campo para determinação da taxa de infiltração .....	23
3.2.6 Modelo de Green-Ampt .....	24
3.2.7. Umidade do solo durante a infiltração ( $\Delta\theta$ ).....	25
3.2.8 Condutividade hidráulica saturada ( $K_0$ ) .....	26
3.2.9 Potencial Mátrico do solo ( $\Psi$ ) .....	27
<b>4 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>30</b>
4.1 ÁREA DE ESTUDO.....	30
4.2 TAXA DE INFILTRAÇÃO .....	31
4.3. TAXA DE INFILTRAÇÃO OBSERVADA .....	32
4.4 TAXA DE INFILTRAÇÃO TEÓRICA .....	35
4.4.1 Determinação do Teor de Umidade .....	35
4.4.2 Determinação da porosidade do solo .....	37
4.4.3 Textura do solo.....	38
4.4.4 Determinação da Matéria Orgânica do solo .....	39
4.4.5 Estimativa da taxa de infiltração pelo modelo de Green-Ampt-Mein-Larson	39
4.5 TAXA DE INFILTRAÇÃO AJUSTADA.....	40
4.6 ANÁLISE ESTATÍSTICA .....	40
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>42</b>

5.1 RESULTADOS OBTIDOS PARA OS TEORES DE UMIDADE .....	42
5.2 CLASSIFICAÇÃO DA TEXTURA DO SOLO.....	43
5.3 POROSIDADE .....	43
5.4 TAXA DE INFILTRAÇÃO TEÓRICA .....	45
5.5 TAXA DE INFILTRAÇÃO E GREEN-AMPT-MEIN-LARSON .....	46
<b>6 CONCLUSÃO .....</b>	<b>53</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>55</b>
<b>APÊNDICE A- TABELAS COM OS RESULTADOS OBTIDOS.....</b>	<b>60</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Um dos principais problemas dos países em desenvolvimento que possuem crescimento urbano desordenado é a existência de uma parcela significativa de pessoas vivendo em áreas de riscos, como por exemplo margens dos rios e encostas. Isto faz com que a população se torne mais vulnerável aos desastres naturais relacionados aos riscos hidrológicos. Dentre estes desastres, destacam-se por ocorrerem com maior frequência os alagamentos, chuvas intensas, deslizamentos, enxurradas, erosão e inundações (CENAD, 2014).

Anualmente, os desastres apresentam um significativo impacto na sociedade brasileira. Segundo o Anuário Brasileiro de Desastres Naturais de 2013, foram oficialmente registrados 493 desastres naturais, dos quais 183 causaram óbitos e afetaram 18.557.233 pessoas. O maior número de ocorrências de inundações foi registrado na macrorregião Sul (33,33% do total), seguida pelas macrorregiões Norte (27,45% do total) e Sudeste (25,98% do total) (CENAD, 2014).

A inundação urbana ocorre quando há submersão de áreas fora dos limites normais de um curso de água e áreas que usualmente não se encontram submersas (áreas planas, ruas e residências). Esse excesso do volume de água que não é escoado pela micro ou pela macrodrenagem, tende a inundar as áreas ribeirinhas, onde, na maioria dos casos, se encontram as vias de circulação, residências e comércios (ECKHARDT, 2008).

O escoamento superficial é a componente do ciclo hidrológico que causa diretamente a inundação urbana, e é ocasionado pelo volume excessivo de água, após o solo atingir seu limite de saturação e não drenar as águas pluviais. Segundo Tucci (2005), o comportamento deste escoamento depende principalmente da cobertura da bacia, da sua declividade e do sistema de drenagem, o que dificulta a sua representação.

Para Porto et al (2009), um dos principais fatores para um projeto de drenagem urbana bem sucedido é uma análise correta e criteriosa do escoamento superficial a qual correlaciona os parâmetros hidrológicos. Erros nesse estudo prévio podem acarretar prejuízos econômicos grandes, gerando obras sub ou superdimensionadas.

Entre os vários parâmetros hidrológicos, é possível afirmar que a infiltração possui grande importância já que, em conjunto com a precipitação, estabelece a água

que irá escoar superficialmente, a quantidade de água disponível para a vegetação e o abastecimento do lençol freático.

De acordo com Sayão (2001), modelos podem ser descritos como: “uma criação cultural, destinado a representar uma realidade, ou algum dos seus aspectos, a fim de torná-los descritíveis qualitativamente e quantitativamente e, algumas vezes, observáveis.”

Como a hidrologia trata de fenômenos naturais complexos, a modelagem hidrológica surge como um auxílio desenvolvido pela ciência para prever e entender melhor o comportamento das bacias hidrológicas (TUCCI, 2005). A modelagem possui limitações devido a heterogeneidade física das bacias (diferentes áreas, tipos de solo, declividades e forma), o que propiciou o desenvolvimento de vários modelos que se diferenciam em função dos dados de entrada utilizados, e os seus objetivos a serem alcançados (previsões de vazões, escoamento superficial, efeitos resultantes da modificação do uso do solo, entre outros).

Nesse contexto, a previsão (*flood forecasting*) e a predição (*flood prediction*) de inundações tem se tornado uma importante estratégia para criar sistemas de alerta de inundações urbanas (Moore et al., 2005; Sene, 2008). Os modelos hidrológicos podem ser usados como ferramenta para criação de cenários de previsão de inundação, para que possam ser tomadas medidas preventivas.

A escolha do modelo hidrológico mais apropriado na simulação de cotas de inundações é essencial (Rogelis et al., 2016) para a obtenção do realismo (Kavetski e Fenicia, 2011). Os modelos hidrológicos do tipo precipitação-vazão são muito usados na modelagem hidrológica, como por exemplo, o modelo IPH II (BERTHELOT, 1970), o método Soil Conservation Service (SCS, 1975) e o modelo Stanford IV (CRAWFORD E LINSLEY, 1966). Além disso, alguns pesquisadores têm combinado modelos dinâmicos de infiltração, como o descrito por Green-Ampt (1911), com o hidrograma unitário (Massari et al., 2015; Bellos e Tsakiris, 2016). Modelos dinâmicos de infiltração são interessantes porque lidam com parâmetros que podem ser obtidos de campo e/ou laboratório e também possibilitam a estimativa do escoamento superficial em resolução temporal sub-horária, considerando a variabilidade da intensidade de precipitação (Van den Putte et al., 2013).

O processo de infiltração é um fator considerado em diferentes modelos hidrológicos (Stanford IV, IPH II e SCS), o que demonstra a importância de se estimar essa característica.

Green-Ampt (1911) criaram uma equação derivada da Lei de Darcy (1856) para estimar a taxa de infiltração de água no solo. Mein e Larson (1973) desenvolveram uma equação simplificada baseada na formulação original de Green-Ampt (1911) a qual ficou conhecida como Green-Ampt-Mein-Larson (1973). As previsões desse modelo têm tido sucesso em comparação com soluções numéricas da equação de Richards (Mein and Larson, 1973).

Alguns estudos realizados com a aplicação da equação de Green-Ampt-Mein-Larson como os de Cecílio (2002 e 2005) e Mello (2003), demonstraram bons resultados com modificações nos parâmetros de entrada do modelo. Estes estudos possuem em comum valores de entradas como a umidade de saturação, condutividade hidráulica do solo e potencial mátrico, variando para diferentes tipos de solos, utilizando o mesmo modelo matemático.

Porém todos estes estudos foram realizados em laboratório, sob condições ideais que não são as encontradas em campo. Zonta (2007) utilizou-se do modelo adaptado Green-Ampt-Mein-Larson para fazer uma comparação entre os resultados simulados e os obtidos em campo, e os valores encontrados demonstraram uma superestimação das taxas de infiltração e infiltração acumulada.

A taxa de infiltração e a umidade do solo, são grandezas hidrológicas que influenciam diretamente no valor do escoamento superficial. Uma importante questão na modelagem hidrológica é a de que o processo de infiltração deveria ser adequadamente considerado no modelo hidrológico (Corradini et al., 2004). As taxas de infiltração são influenciadas pelo teor de umidade antecedente (TAU) do solo (Dingman, 2015) e, conseqüentemente, afeta a quantidade do escoamento superficial (Massari et al., 2013). Quanto mais úmido encontra-se o solo, menor será sua capacidade de infiltração. Assim, a taxa de infiltração e a condição de umidade possuem grande importância para a modelagem de inundações.

Desta forma, o tema deste trabalho traz a importância em uma análise mais criteriosa da taxa de infiltração no solo, visto que tem como pretensão determinar a taxa de infiltração no solo de Pato Branco – PR e comparar com o desempenho do modelo de Green-Amp-Mein-Larson.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem como objetivo determinar a taxa de infiltração de água em um solo com alto teor de argila, sob diferentes condições de umidade.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para que fosse atingido o objetivo geral foram listados os seguintes objetivos específicos:

- Determinar em campo (*in situ*) a taxa de infiltração de água no solo;
- Determinar em laboratório o teor de umidade e a porosidade do solo;
- Classificar o solo quanto a sua textura;
- Comparar os valores de taxa de infiltração medidos em campo com o modelo matemático de Green-Ampt-Mein-Larson.
- Ajustar uma nova curva de infiltração com o melhor valor estimado de condutividade hidráulica.

### 3 REFERÊNCIAS TEÓRICO

#### 3.1 TEXTURA DO SOLO

O solo é constituído de várias frações granulométricas, ou seja, o tamanho e as formas das partículas contidas no solo se alteram conforme as características de cada tipo de solo. A textura do solo é a proporção entre a quantidade de areia, silte e argila em uma amostra determinada de solo.

A textura do solo é a proporção em que se encontram os diferentes tamanhos de partículas em determinada massa de solo. Consiste na propriedade física do solo que menos sofre alteração ao longo do tempo EMBRAPA (1997). Este está relacionado com a relevância direta na taxa de infiltração de água no solo, na quantidade de vazios entre os grãos, na capacidade de retenção de água, na nutrição, e na coesão das partículas do solo.

Os solos são classificados quanto a sua textura, sendo:

**Solos de Textura Arenosa:** são solos com alta concentração de areia, em torno de 70% e de argila abaixo de 15%. São leves, permeáveis, baixa capacidade de retenção de água e de matéria orgânica. É um solo altamente susceptível a erosão, com alta taxa de infiltração de água no solo e por consequência disso possui elevadas perdas por percolação.

**Solos de Textura Média:** Possuem equilíbrio entre a quantidade de argila, silte e areia. Apresentam boa drenagem e capacidade de retenção de água no solo e médio índice de erosão.

**Solos de Textura Argilosa:** Trata-se de solos com alto teores de argila, superior a 35%. Possuem baixa permeabilidade e alta capacidade de retenção de água no solo. Apresenta maior coesão entre as partículas, o que dificulta a penetração no solo. São resistentes a erosão, mas susceptíveis a compactação.



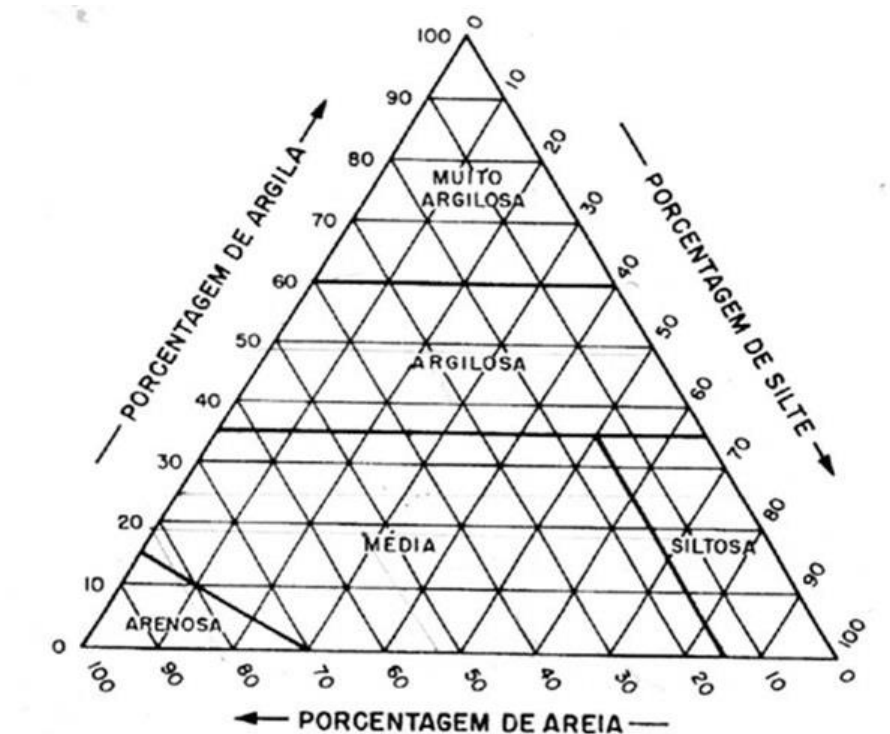


Figura 1- Diagrama triangular de grupamento textural do solo.  
Fonte: EMBRAPA (1997)

A composição granulométrica do solo possui a capacidade de influenciar nas propriedades físicas dos solos.

### 3.1.1 Porosidade do solo

No solo existem espaços vazios chamados de poros, onde encontra-se ar e água. A porosidade é uma propriedade de física que corresponde entre o volume de solo não ocupado por partículas sólidas, ou seja, a reação entre o volume de poros e o volume total da amostra TEIXEIRA (2009).

A porosidade primária é intergranular, gerada justamente com os sedimentos ou as rochas. Nos materiais sedimentares o tamanho e a forma das partículas influenciam na porosidade. Já secundária é originada após a formação das rochas e ocorre por falha ou fratura durante a sua formação.

Segundo a EMBRAPA (1997) as areias possuem um grande espaço poroso que permite a drenagem da água dos solos, o qual faz elas reterem pouca água. Já as argilas absorvem relativamente grandes quantidades de água pois possuem espaços porosos menores, o que implica numa retenção maior de água no solo.

A porosidade total é a parcela da macroporosidade do solo e a microporosidade. A macroporosidade é responsável pela movimentação de água e ar no interior do solo, está relacionado ao fluxo de água pela gravidade, a infiltração, drenagem e transporte. A microporosidade é responsável pela retenção de água no solo, logo quanto maior for a proporção de microporos em relação aos macroporos, menor será a infiltração de água no solo e pior será seu arejamento. Outra maneira de determinar a porosidade de um solo é por meio da sua massa específica, expressa na seguinte equação:

Equação (1)

$$n = 1 - \left[ \frac{\text{Massa Específica do Solo}}{\text{Massa Específica dos Grãos}} \right]$$

Sendo:

Equação (2)

$$\text{Massa Específica do Solo} = \frac{\text{massa seca dos grãos do solo (g)}}{\text{volume (cm}^3\text{)}}$$

Equação (3)

$$\text{Massa Específica dos Grãos} = \frac{\text{massa seca dos grãos do solo (g)}}{\text{volume dos grãos do solo (cm}^3\text{)}}$$

Onde  $n$  é a porosidade total do solo ( $\text{m}^3\text{m}^{-3}$ ). Maia (2011) ressalta a importância da caracterização do sistema poroso do solo em estudos que envolvam armazenamento e movimento da água e gases no solo, e estima que a porosidade total varia entre 0,30 e 0,70  $\text{m}^3\text{m}^{-3}$ , de acordo com os diferentes tipos de solos e suas respectivas densidades.

### 3.1.2 Permeabilidade do solo

A permeabilidade do solo é a sua capacidade de permitir o escoamento através de seus vazios, podendo ser maior ou menor dependendo do tipo do solo. Conhecer o valor dessa propriedade física é importante para a estimativa do volume de água que irá percolar o solo, a drenagem, adensamento e o rebaixamento do solo.

O grau de permeabilidade no solo é expresso como coeficiente de permeabilidade, sua determinação é embasada na lei experimental de Darcy, a qual

a velocidade de percolação é diretamente proporcional ao gradiente hidráulico CAPUTO (2000).

Alguns Fatores que influenciam na permeabilidade do solo são a granulometria que está relacionada ao tamanho das partículas constituintes do solo e influenciam no valor da condutividade hidráulica ( $K_0$ ). Podendo ser analisada na tabela 1 abaixo.

Tabela 1- Valores de permeabilidade do solo

Permeabilidade		Tipo de solo	$K_0$
Solos Permeáveis	Alta	Pedregulhos	$> 10^{-3}$
	Alta	Areias	$10^{-3}$ a $10^{-5}$
	Baixa	Siltos e argilas	$10^{-5}$ a $10^{-7}$
Solos Impermeáveis	Muito baixa	Argila	$10^{-7}$ a $10^{-9}$
	Baixíssima	Argila	$< 10^{-9}$

Fonte: CAPUTO (2000)

Outro fator que está relacionado é o índice de vazios, que por sua vez está relacionado com a porosidade, pois quanto mais poroso for o solo maior será seu índice de vazios e, portanto, mais permeável (KLEIN, 2012).

A predominância de alguns minerais no solo na sua composição mineralógica também influencia. A estrutura do solo é ocasionada pelo arranjo das partículas é mais simplificada nas areias o que ajuda a água a fluir com facilidade.

E por sua vez quanto maior for a temperatura, menor será a viscosidade da água, o que implica numa maior permeabilidade facilitando o escoamento pelos poros do solo. Portanto considera-se solos permeáveis, ou de drenagem livre, aqueles que apresentam permeabilidade superior a  $10^{-7}$  m/s (KLEIN, 2012).

### 3.2 DINÂMICA DA ÁGUA NO SOLO

Entende-se como dinâmica da água no solo a capacidade da água se movimentar no solo e a sua permanência nele. Assuntos relacionados a esse tema é apresentado a seguir.

#### 3.2.1 Umidade do solo

A umidade do solo é relativa a quantidade de água presente nas partículas do solo. Ela pode ser expressa em massa ou volume de água. A umidade gravimétrica é

definida em relação a massa de água e a massa do solo seco. Já a umidade volumétrica é a relação entre o volume de água e o volume total, o qual inclui o volume de sólidos, de ar e água (TUCCI, 2009).

Equação (4)

$$\theta = \frac{m_a - m_s}{m_s} \times 100$$

Onde

$\theta$  = umidade gravimétrica (ad);

$m_a$  = massa de solo úmido(g);

$m_s$  = massa de solo seco (g).

Equação (5)

$$\theta = \frac{V_a}{V_t}$$

Onde

$\theta$  = umidade volumétrica (ad);

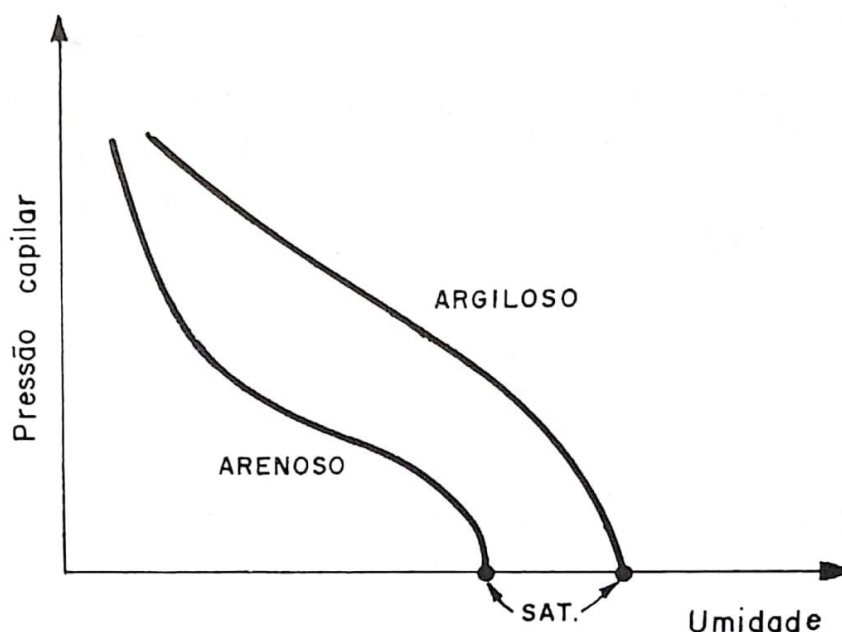
$V_a$  = volume de água (cm<sup>3</sup>);

$V_t$  = volume total de solo (cm<sup>3</sup>).

### 3.2.2 Curva de retenção de água no solo

A umidade está relacionada com a pressão capilar do solo, pois a água contida nele varia em função do volume e tamanho dos poros, esta variação está relacionada com a textura do solo, apresentando valores diferentes de umidade para solos argilosos e arenosos.

O pequeno armazenamento de água no solo mesmo em baixas pressões, em solos arenosos é devido a predominância de grandes poros, o que faz com que a umidade decaia incrementando uma pressão abrupta. Já em solos argilosos a curva de retenção mostra a diminuição gradativa da umidade, decorrente do grande número de poros com pequenas dimensões que esse solo possui (KLEIN, 2012). Este comportamento pode ser visto na figura 2.



**Figura 2- Curva de retenção e textura**  
Fonte: TUCCI (2009)

### 3.2.3 Infiltração

A infiltração pode ser caracterizada como a entrada de água no solo através de sua superfície. Ela pode definir quanto a água de uma chuva ou irrigação flui sobre o solo e quanto vai para baixo do solo, seja vertical ou horizontalmente de acordo com o solo (LIBARDI, 2012). É de grande validade prática, pois afeta diretamente no escoamento superficial, que é o componente do ciclo hidrológico responsável pelos processos de erosão e inundações. Já a taxa de infiltração está relacionada a quantidade de água que infiltra no solo ao longo de um determinado tempo.

A taxa de infiltração  $f(t)$  corresponde à lâmina de água infiltrada por unidade de tempo, sendo expressa na forma:

Equação (6)

$$f(t) = \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

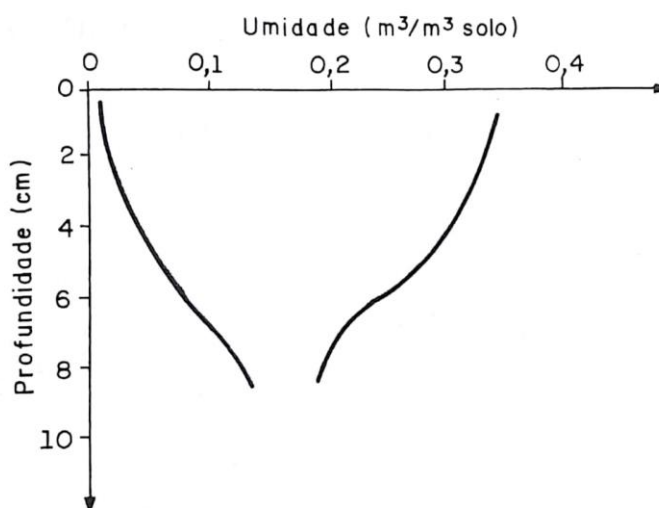
Onde:

$\Delta I$  = Variação da lâmina de água sobre a superfície do solo (cm);

$\Delta t$  = Variação do tempo (min).

Conforme ocorre a infiltração de água no solo, as camadas superiores vão umedecendo de cima para baixo, tendendo a saturar inicialmente na camada

superficial, gerando um perfil de umidade do solo onde ele decresce conforme a profundidade. Porém quando ocorre a interrupção da infiltração ou cessa a precipitação, ocorre a redistribuição de umidade no solo, gerando um perfil de umidade inverso no solo (TUCCI, 2009). Esta situação pode ser observada na figura 3.



**Figura 3- Evolução do perfil de umidade em um solo.**  
Fonte: TUCCI (2009)

Existem diferentes métodos para se determinar a infiltração de água em solos. Eles podem ser empíricos ou por considerações físicas, mas sempre aplicados a solos homogêneos que permaneçam nesse estado ao longo do processo (LIBARDI, 2012).

### 3.2.4 Capacidade de infiltração e taxa de infiltração

A taxa de infiltração está relacionada a quantidade de água que infiltra no solo ao longo de um determinado tempo. Já a capacidade de infiltração é o potencial que o solo tem de absorver água através da superfície, em termos de lâmina d'água (TUCCI, 2009).

Se uma precipitação incide no solo com uma intensidade menor que a sua capacidade de infiltração, então toda água penetra no solo diminuindo gradativamente a capacidade de infiltração até que sua intensidade se iguale a precipitação. Com isso a infiltração tem as mesmas taxas da capacidade de infiltração, que passa a decrescer exponencialmente no tempo tendendo a um valor mínimo de infiltração. A parcela que não infiltrou no solo escoou superficialmente.

Após encerrado a precipitação a taxa de infiltração se anula e a capacidade de infiltração volta a crescer, pois o solo continua a perder umidade para as camadas mais profundas (TUCCI, 2009).

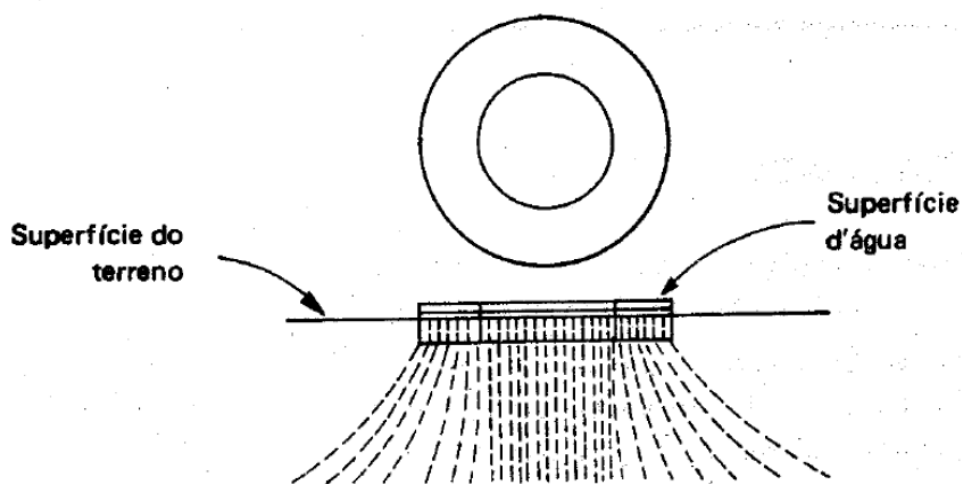
Além da intensidade da precipitação, existem outros fatores que interferem na capacidade de infiltração do solo. São eles:

- Tipo do solo: A porosidade do solo, a distribuição granulométrica dos grãos do solo e o estado de fissuração das rochas influenciam diretamente na capacidade de infiltração;
- Umidade do solo: Quanto mais elevada for a umidade do solo menor será a sua capacidade de infiltração;
- Compactação do solo: Está torna o solo mais impermeável o que diminuiu sua capacidade de infiltração;
- Alteração da macroestrutura do terreno: A capacidade pode ser aumentada devido a fenômenos naturais, escavação de animais, decomposição de raízes, entre outros;
- Cobertura vegetal: Dificulta o escoamento superficial e diminui a umidade do solo o que acarreta numa maior capacidade de infiltração;
- Temperatura do solo: Temperaturas menores aumentam a viscosidade da água o que reduz a sua capacidade;
- Presença de vazios: O ar retido no interior dos grãos desacelera a infiltração do solo.

### 3.2.5 Método de campo para determinação da taxa de infiltração

Um dos métodos para se determinar a taxa de infiltração em campo é por meio de infiltrômetros, os quais obtêm valores de infiltração no solo ao longo do tempo. O mais usual é o método dos anéis concêntricos ou também chamado de duplo anel. Este método é constituído por dois cilindros metálicos de diâmetros distintos, sendo que o menor possui diâmetro de 30 cm e o maior 60 cm, a altura é a mesma para ambos com valor próximo de 50 cm (ASTM ,2003).

O termo concêntrico é empregado devido ao fato de os dois anéis possuírem o mesmo centro geométrico. O cilindro de fora é responsável por promover o fluxo vertical em uma única direção abaixo do anel interno (figura 3), ou seja, minimizar a dispersão lateral da água infiltrada no anel interno, possibilitando obter um valor mais preciso na leitura do anel interno PARCHEN (2007).



**Figura 4- Anéis concêntricos.**

Fonte: UNAMA (2009)

Segundo Klein (2012) o método consiste em manter uma lâmina de água com altura constante na superfície do solo e determinar o volume infiltrado em determinado intervalo de tempo até a taxa constante.

Os cilindros são cravados no solo até uma profundidade desejada a qual varia de 5 cm a 15 cm, ficando com uma altura livre. Em seguida são preenchidos de água com altura em torno de 15 cm, esta medida sendo observada na régua de leitura que fica posicionada dentro do anel interno, a determinação da infiltração é medida através da leitura do anel interno no decorrer do tempo, em intervalos determinados (PAZ, 2004).

### 3.2.6 Modelo de Green-Ampt

A equação de Green-Ampt é derivada da equação de Darcy através das seguintes simplificações:

O solo é considerado saturado na superfície e abaixo; o solo mantém a mesma umidade antes da precipitação. Essa condição é válida a medida que a umidade se aprofunda no interior do solo. Na superfície que separa o solo saturado do não saturado, a tensão capilar permanece a mesma, em qualquer posição e tempo. Em suma trata-se de um pistão de água preenchendo os poros do solo succionado para baixo com tensão constante (TUCCI, 2009).



As equações 7 e 8 descrevem o modelo de Green-Ampt, e são expressas na seguinte forma:

Equação (7)

$$f(t) = K_0 \left[ \frac{\psi \Delta \theta}{F(t)} + 1 \right]$$

Equação (8)

$$F(t) = K_0 t + \psi \Delta \theta \ln \left( 1 + \frac{F(t)}{\psi \Delta \theta} \right)$$

Onde:

$F(t)$  = infiltração acumulada ao longo do tempo (L);

$f(t)$  = taxa de infiltração em um determinado tempo  $t$  (L/T);

$\Psi$  = potencial mátrico do solo (L);

$\Delta \theta$  = aumento da umidade do solo durante a infiltração (ad);

$K_0$  = condutividade hidráulica saturada (L/T);

$t$  = tempo no qual o processo de infiltração ocorre (T).

O modelo de Green-Ampt considera que desde antes de ocorrer a infiltração de água no solo, a superfície do solo encontra-se saturada. Porém em condições de precipitações a camada superficial do solo não se encontra saturada. Desta forma Mein-Larson (1973) modificaram o modelo de Green-Ampt para determinar a infiltração que ocorre antes da saturação da superfície do solo. Sendo assim, matematicamente as equações são idênticas, porém consideram condições diferentes para saturação do solo.

Os parâmetros  $K_0$ ,  $\Delta \theta$  e  $\Psi$  devem ser conhecidos para a estimativa da infiltração da água no solo. Tais parâmetros do modelo de Green-Ampt-Mein-Larson são críticos para aplicações da predição da infiltração (CECILIO,2005).

Ainda que o modelo possua limites nas condições empregadas, ele demonstra diretamente como as propriedades do solo e o teor de umidade antecedente afetam o processo de infiltração (DINGMAN, 2015).

### 3.2.7. Umidade do solo durante a infiltração ( $\Delta \theta$ )

A variação da umidade do solo durante a infiltração pode ser descrita na equação 9 como:

Equação (9)

$$\Delta\theta = n - \theta$$

Onde:

$n$  = Porosidade total do solo (ad);

$\theta$  = Teor de umidade inicial do solo (ad).

### 3.2.8 Condutividade hidráulica saturada ( $K_0$ )

A condutividade hidráulica é uma propriedade física de um meio poroso que determina quantitativamente o movimento da água através deste meio (KLEIN, 2012). Ela é essencial para qualquer estudo que envolva o movimento da água no solo, seja para estudar a própria dinâmica da água, ou na determinação da capacidade de drenagem de um solo.

Os métodos para a determinação da condutividade hidráulica dos solos podem ser divididos de duas formas, sendo eles: os métodos em laboratório e os métodos de campo. Nos métodos de laboratórios são necessárias amostras do solo e podem ser subdivididos pelas condições de saturação e de não saturação. Já nos métodos de campo essa subdivisão ocorre de acordo com o lençol freático, e se a medida da condutividade hidráulica é feita acima ou abaixo deste lençol (LIBARDI, 2012).

Segundo Cecílio (2005), um melhor estimador para a condutividade hidráulica pode ser a taxa de infiltração estável ( $T_{ie}$ ) a qual pode ser vista na figura 5. O mesmo autor concluiu que o uso da taxa de infiltração estável apresenta melhores resultados que o uso do valor de  $K_0$  determinado pelo método de campo do permeâmetro de carga constante.

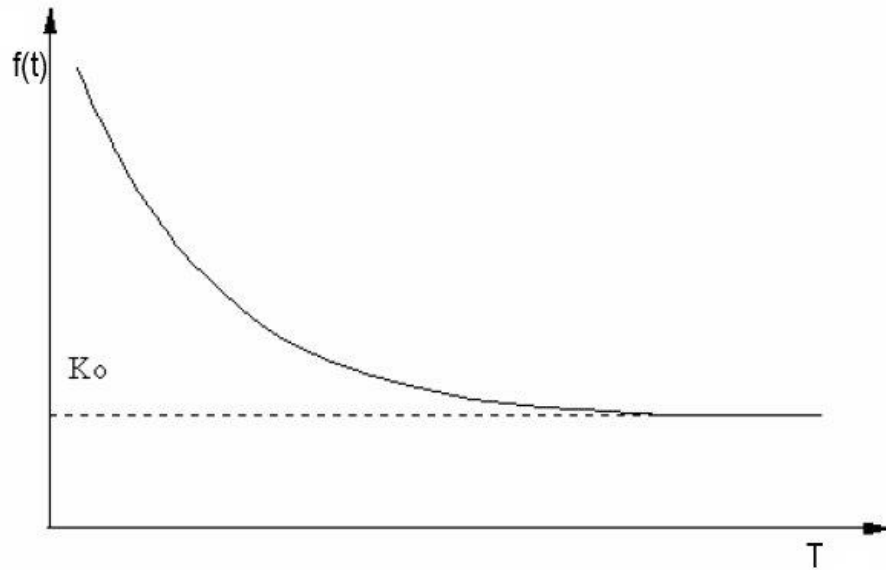


Figura 5- Curva representativa em função da taxa de infiltração pelo tempo.

### 3.2.9 Potencial Mátrico do solo ( $\Psi$ )

O Potencial mátrico de um solo está intrinsecamente relacionado às forças de capilaridade e as tensões de superfícies das partículas do solo. A capilaridade retém a água nos microporos do solo e as tensões de superfície retém a água nas superfícies das partículas do solo.

De acordo com Dingman (2015), as relações entre o potencial mátrico do solo e a condutividade hidráulica controlam todos os processos hidráulicos que ocorrem próximos a superfície do solo, tais como: infiltração, redistribuição, escoamento superficial, água disponível para as plantas e recarga de aquíferos. Tais parâmetros são modelados de forma analítica e relacionados ao tipo de solo e suas propriedades.

O modelo analítico de van Genuchten é um dos mais utilizados para descrever o potencial mátrico do solo, sendo os parâmetros  $\theta_{vg}^*$  e  $\alpha$  características ajustadas de forma que traduzam valores próximos da realidade (DINGMAN, 2015). A equação de van Genuchten (1980) para o potencial mátrico é descrita na forma:

Equação (10)

$$|\Psi(\theta_{vg}^*)| = \left(\frac{1}{\alpha}\right) \times \left[\theta^{*\frac{(l-1)}{l}} - 1\right]^{1/l}, \quad \theta_{vg}^* < 1;$$

$$|\Psi(\theta_{vg}^*)| = 0, \quad \theta_{vg}^* = 1$$

Onde:

$\alpha$  = Constante de van Genuchten para o potencial mátrico [ $L^{-1}$ ];

$l$  = Constante que depende da distribuição do tamanho dos poros [ad];

$\theta^*$  = Grau de saturação (ad).

Obtido pela fórmula:

Equação (11)

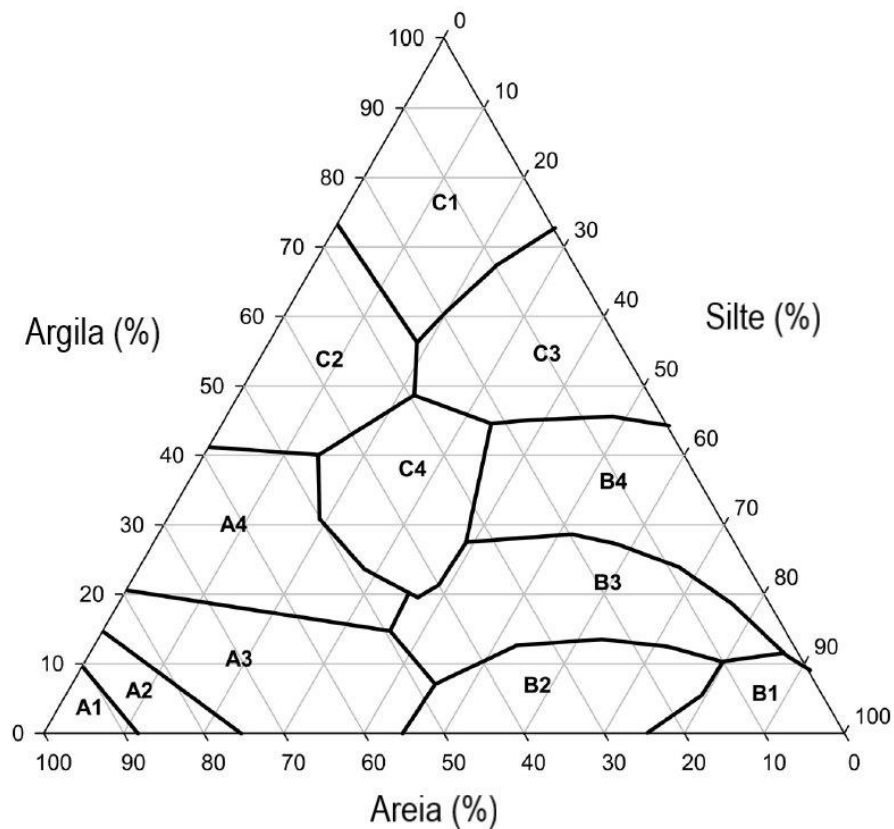
$$\theta^* = \frac{\theta - \theta_r}{n - \theta_r}$$

$\theta_r$  = Teor de umidade residual (ad).

$\Theta$  = Teor de umidade (ad)

$n$  = Porosidade do solo

Twarakavi et al. (2010) estimaram os parâmetros de Van Genuchten como funções da porcentagem de areia, silte e argila, classificando as relações de porcentagens em 12 classes que estão dispostas no triângulo da figura 6.



**Figura 6- Classes hidráulicas do solo.**

Fonte: TWARAKAVI et al. (2010)

Para o cálculo da constante  $\alpha$  utilizou-se a seguinte expressão.

Equação (12)

$$\alpha = \exp^{(-2.486+0.025*AREIA-0.352*ORG-2.617\rho-0.023*ARGILA)}$$

E para o cálculo do parâmetro I.

Equação (13)

$$I = \exp^{(0,053-0,009*AREIA-0,013*ARGILA+0,00015*AREIA^2)}$$

Onde:

AREIA = Fração de areia do solo (%);

ORG = Fração de matéria orgânica do solo (%);

$\rho$  = massa específica do Solo ( $\text{g}/\text{cm}^3$ );

ARGILA = Fração de argila do solo (%).

O teor de umidade residual ( $\theta_r$ ) é tabelado e varia de acordo com a classe hidráulica do solo, classificada anteriormente na figura 6. Os valores do teor de umidade residual para diferentes classes encontram-se na tabela 2 a seguir: Com a obtenção de todos os parâmetros estipulados na equação de Van Genuchten, é possível calcular o potencial mátrico do solo.

Classes hidráulicas de solo	$\Theta_r$
A1	0,055 (0,002)
A2	0,053 (0,002)
A3	0,051 (0,002)
A4	0,055 (0,003)
B1	0,057 (0,011)
B2	0,053 (0,003)
B3	0,056 (0,007)
B4	0,072 (0,015)
C1	0,072 (0,012)
C2	0,091 (0,013)
C3	0,069 (0,016)
C4	0,064 (0,015)

\*Valores entre parenteses são os desvios padrão

Fonte: Twarakavi (2010)

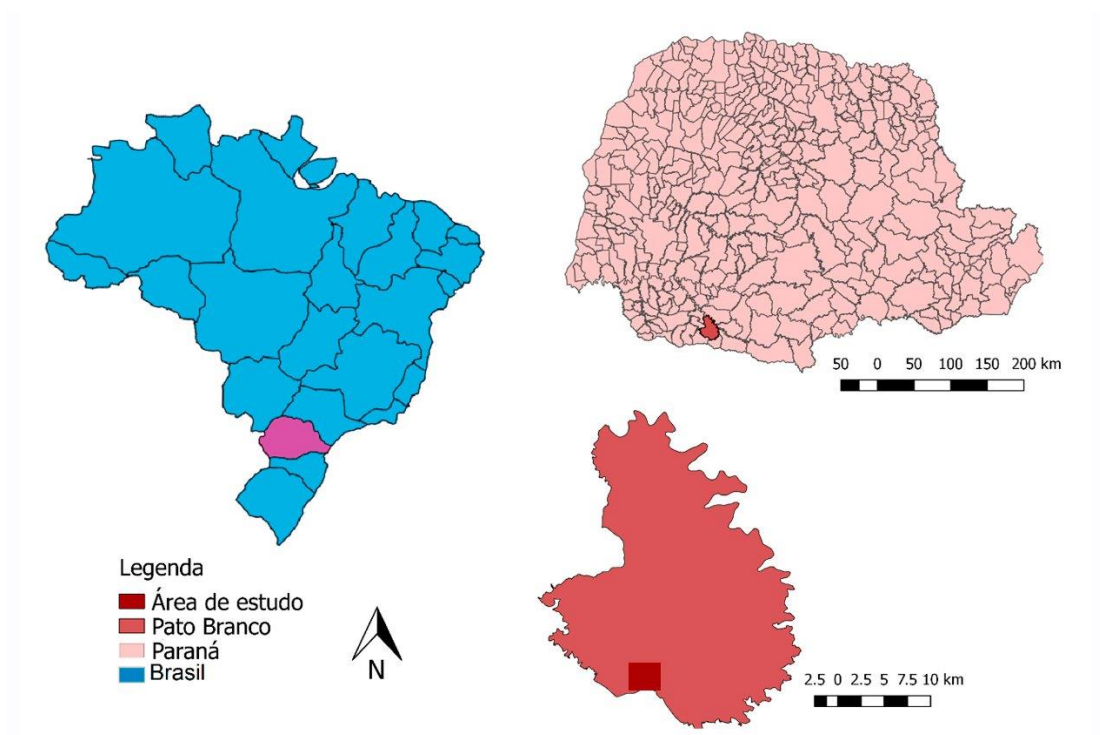
## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 ÁREA DE ESTUDO

O município de Pato Branco está localizado na região Sudoeste do estado do Paraná e sua sede está a uma distância aproximada de 430km da capital do estado, Curitiba. Possui uma área total de 539,087 km<sup>2</sup> e uma população estimada de 80710 habitantes segundo dados do IBGE (2010). Conta com uma área urbana de 48 km<sup>2</sup> dividida em 45 bairros. O clima é Subtropical úmido Mesotérmico, com verões quentes com tendência a chuvas (temperatura média superior a 22°C), e invernos com geadas poucos frequentes (temperaturas médias inferior a 18°C), sem estação seca definida.

O seu perímetro urbano situa-se ao longo da bacia do Rio Ligeiro, tendo elevações acentuadas para Leste e Oeste. Em relação a hidrografia é banhado pelas sub-bacias dos rios Pato Branco e Vitorino, afluentes do rio Chopim, que pertencem a bacia hidrográfica do Rio Iguaçu, sendo seus principais afluentes o Rio Pato Branco, Rio Ligeiro, Rio Vitorino, Rio Chopim os seus principais Rios. O solo é predominantemente latossolo (solos argilosos com cores avermelhado-escuras), composto por silte, areia e argila-siltosa.

A área de estudo é representada pela área urbana da cidade de Pato Branco - PR (Figura 7). Está localizada atrás da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Pato Branco e à direita do bairro Fraron. Trata-se de um loteamento residencial novo com poucas alterações feitas no período estudado. Coordenadas: 26°11'53.8"S 52°41'47.1"W.



**Figura 7- Localização da área de estudo**

Essa área de estudo foi escolhida devido a sua proximidade geográfica com a Universidade e sua viabilidade no transporte dos materiais utilizados, na facilidade em encontrar terrenos com o solo exposto e determinar os parâmetros hidrológicos necessários.

#### 4.2 TAXA DE INFILTRAÇÃO

Este trabalho realizou três cálculos para a taxa de infiltração na área de estudo. Compreende-se como “taxa de infiltração observada” os valores obtidos por meio de ensaios conduzidos em campo, “taxa de infiltração teórica” os valores obtidos matematicamente utilizando a equação de Green-Ampt-Mein-Larson e por fim, a “taxa de infiltração ajustada”, a qual teve seus valores obtidos por meio de ajustes matemáticos iterativos nos parâmetros de Green-Ampt-Mein-Larson de forma que os resultados melhor se aproximem dos valores encontrados pela taxa de infiltração observada.

### 4.3. TAXA DE INFILTRAÇÃO OBSERVADA

Para a estimativa da infiltração de água no solo em ensaio de campo, foi utilizado o método do infiltrômetro de anéis concêntricos. A facilidade de obtenção e o custo para se trabalhar com os anéis foram fatores determinantes para a escolha deste método. O método consiste em fazer a leitura de uma lâmina de água na superfície do solo em determinados intervalos de tempo até que a variação da lâmina seja constante entre pelo menos três intervalos de tempo, sendo este valor constante denominado taxa de infiltração estável ( $T_{ie}$ ). O equipamento é composto por dois anéis, confeccionados em chapa de aço A-60 com espessura de 2,75mm. O anel externo possui diâmetro de 60 cm e o anel interno possui diâmetro de 30 cm, ambos com altura de 30 cm, seguindo as recomendações da norma americana (ASTM, 2003).

Para obter valores da taxa de infiltração observada foram realizados 8 ensaios entre os meses de janeiro a maio de 2017, e de março a maio de 2018 na área de estudo. Foi considerado para este estudo apenas o solo exposto, por se tratar de uma região não impermeabilizada pelas edificações, encontrando-se ainda em expansão. O cronograma com a ordem dos ensaios pode ser visto na tabela 3 a seguir.

Tabela 3- Datas da realização dos ensaios de campo

Cronograma dos Ensaios	
Ensaio 1	25/03/2017
Ensaio 2	13/05/2017
Ensaio 3	18/03/2018
Ensaio 4	18/03/2018
Ensaio 5	01/04/2018
Ensaio 6	01/04/2018
Ensaio 7	11/03/2017
Ensaio 8	29/04/2017

O ensaio é realizado cravando-se os anéis em uma profundidade aproximada de 6 cm no solo, devido a textura do solo. Para a leitura da lâmina de água foi utilizada uma régua graduada com precisão de 1 mm (figura 8).





**Figura 8- Anéis concêntricos inseridos no solo.**

É necessário realizar uma limpeza superficial do solo a fim de evitar que algum resíduo possa provocar erros na execução do ensaio, feito isso, pode-se iniciar a inserção dos anéis no solo, por meio de consecutivos golpes até que se atinja a profundidade desejada. Estes golpes são feitos sob uma superfície plana que fica sob o anel (figura 9), para evitar qualquer dano nos anéis e também por facilitar a execução do trabalho, e por fim mede-se o prumo dos anéis com auxílio de uma régua de nível.



**Figura 9-Anéis concêntricos e equipamentos utilizados para inserção.**

A água é inserida nos cilindros externo e interno (figura 10), adicionando um filme plástico no cilindro interno para que a inserção da água não modifique a superfície do solo. A leitura é realizada somente no cilindro interno, pois o anel externo tem a finalidade de neutralizar o efeito da infiltração lateral e torna-la unidimensional.

A partir da leitura inicial da altura da lâmina de água, com régua graduada, o filme plástico é retirado e inicia-se a contagem do tempo que a água leva para infiltrar no solo. É necessária uma reposição do nível de água sempre que estas chegarem a 25% do valor da lâmina de água inicial, ou quando a lâmina atinge a marca de 10 cm de altura em relação ao solo.





**Figura 10-Anéis concêntricos preenchidos com água.**

As leituras são realizadas inicialmente em um intervalo de tempo pequeno, variando de 1 em 1 minuto, e aumentam gradativamente no decorrer do ensaio até serem feitas em intervalos de 10 em 10 minutos. O ensaio é finalizado quando se obtém três medidas iguais denominadas taxa de infiltração estável ( $T_{ie}$ ), isto indica que o solo atingiu seu ponto de saturação.

#### 4.4 TAXA DE INFILTRAÇÃO TEÓRICA

Para a realização do cálculo de infiltração teórico é necessário determinar os valores de porosidade, teor de umidade e a análise granulométrica do solo. Os métodos utilizados são descritos nas seções a seguir.

##### 4.4.1 Determinação do Teor de Umidade

Os dados do teor de umidade do solo foram obtidos através de ensaios realizados em laboratório com amostras indeformadas retiradas da área de estudo. Toda a aparelhagem necessária, a execução do ensaio e os cálculos foram baseados

na NBR 6457 (ABNT, 1986) que trata sobre o método para a determinação do teor de umidade em laboratório.

As amostras indeformadas de solo foram retiradas com cilindros de aço com borda inferior cortante, comumente conhecidos como ‘Anéis de Kopeck” (figura 11), cravados no solo após uma limpeza superficial com profundidade em torno de 6 cm. Para a inserção dos cilindros no solo utilizou-se uma placa metálica para receber os golpes de uma marreta de borracha.



**Figura 11-Anéis de Kopeck com solo contido dentro para a determinação do teor de umidade.**

Este método possui certas desvantagens como a dificuldade em se retirar o cilindro do solo, necessitando uma escavação prévia em volta do anel, além da necessidade de limpeza do solo aderente na parede externa do cilindro (KLEIN, 2012).

Para evitar que as amostras não perdessem sua umidade durante o transporte do local de coleta até o laboratório, elas foram embaladas em plástico filme. Depois foram pesadas e envoltas em papel alumínio a fim de evitar a perda de qualquer material após sua secagem. Na sequência para realização da sua secagem foram levadas a um estufa com temperatura de 105°C por 24 horas, seguindo recomendações da NBR 6457 (ABNT, 1986). O peso dos respectivos cilíndricos e do papel alumínio são desconsiderados para fins de cálculo. Após a secagem das amostras, elas foram novamente pesadas para obter a massa seca do solo, e por meio da equação 4 (página 18) obteve-se o teor de umidade. Calculou-se a umidade para as três amostras retiradas em campo e então optou-se por utilizar a média das

mesmas, para fim de minimizar erros e melhor se aproximar do valor real de umidade para a data em questão.

#### 4.4.2 Determinação da porosidade do solo

Para conhecer a porosidade do solo é necessário a conhecer a massa específica dos grãos do solo e a massa específica do solo. Para conhecer a massa da massa específica do solo, utilizou-se o método do cilindro volumétrico (KLEIN, 2012). Os cilindros utilizados foram os mesmos usados para o ensaio de teor de umidade (figura 11), suas dimensões foram obtidas com um paquímetro com precisão de 0,05 mm.

As amostras foram secas em estufa com temperatura de 105 °C por um período de 24 h. Após a retirada da amostra foi medido a massa com balança de precisão de 0,01 g. Desta forma obteve-se o volume interno do cilindro em  $\text{cm}^3$  e a massa seca dos sólidos em gramas.

Para a determinação da massa específica dos grãos do solo (grãos dos minerais do solo) utilizou-se o método dos balões volumétricos (KLEIN, 2012), o qual consiste em utilizar um balão volumétrico de 50 ml preenchido com 20 g de solo (figura 12).



**Figura 12-Balão Volumétrico contendo 20g de solo utilizado no ensaio.**

Com uma proveta graduada (figura 13) contendo álcool etílico preenche-se o volume do balão até sua marca. A diferença entre o volume do balão menos o volume

de álcool utilizado para preencher o balão, é denominado volume de grãos do solo (em ml).



**Figura 13- Proveta graduada contendo álcool etílico.**

Em posse dos volumes dos grãos do solo, do volume do cilindro interno e da massa seca dos grãos do solo, é possível encontrar as massas específicas do solo e dos grãos. As mesmas foram calculadas pelas equações 2 e 3 respectivamente, descritas no item 3.1.1. Calculada as massas específicas é possível encontrar a porosidade por meio da equação 1 (página 16).

#### 4.4.3 Textura do solo

Para se analisar a textura de um solo é necessário um procedimento operacional que visa romper os agregados do solo, onde as partículas que são isoladas ficam suspensas, e com uma combinação de energia mecânica e química uma suspensão estabilizada é formada, podendo ser quantificada após a separação dessas frações (EMBRAPA, 2012).

Para determinar a composição granulométrica do solo foi necessária a retirada de uma amostra na área de estudo. A mesma foi seca em estufa com temperatura mantida a 105°C durante 24 h e passante na peneira 2,00 mm. 20 g dessa amostra

foram encaminhados para o Laboratório de Análise de Solo - UTFPR, para determinar a porcentagem de areia, silte e argila presentes no solo.

#### 4.4.4 Determinação da Matéria Orgânica do solo

Para determinar o teor de matéria orgânica do solo em questão foi necessário a realização de outro ensaio, muito semelhante ao do teor de umidade. Seguindo a recomendação de Silva et.al (1999), o ensaio foi realizado pesando a massa de uma amostra seca em estufa a 105°C por 24 horas a fim de eliminar qualquer porcentagem de água presente nela. Posteriormente essa mesma amostra foi encaminhado à calcinação em uma mufla na temperatura de 700° C por 5 horas. Após o seu esfriamento a amostra foi pesada novamente, conhecendo sua massa após a calcinação, para então obter a porcentagem de matéria orgânica do solo.

#### 4.4.5 Estimativa da taxa de infiltração pelo modelo de Green-Ampt-Mein-Larson

O modelo de Green-Ampt-Mein-Larson proposto tem como objetivo estimar a taxa de infiltração no solo para então poder comparar esses valores com a taxa de infiltração obtidas em campo.

A condutividade hidráulica saturada ( $K_0$ ) utilizada nesta estimativa foi a taxa de infiltração estável ( $T_{ie}$ ) obtida nos ensaios de campo, descrito no item 4.3. Esta taxa de infiltração é encontrada quando o solo atinge o nível máximo de água infiltrada e pode ser caracterizado como os últimos 3 valores constantes do ensaio de campo.

Para a variação da umidade do solo ( $\Delta\theta$ ), é necessário conhecer a porosidade e o teor de umidade do solo no dia em questão. Com os valores encontrados o  $\Delta\theta$  pode ser encontrado pela equação 9 (página 24).

A determinação do potencial mátrico do solo ( $\Psi$ ) depende de um modelo analítico, que neste trabalho foi adotado o modelo de van Genuchten, e seu valor encontrado pela equação 10 (página 25). Como a equação é em função dos parâmetros  $\theta^*$ ,  $l$  e  $\alpha$ , tornou-se necessário conhecer as porcentagens de areia, silte e argila contidas no solo, assim como o valor da umidade residual ( $\theta_r$ ) de acordo com a classificação utilizada por Twarakavi (2010).

Com base nos dados das taxas de infiltração obtidas em campo e os ensaios realizados em laboratórios, foi possível estimar matematicamente através do software Microsoft Excel 2016 os valores do potencial mátrico do solo utilizando a equação de Van Genuchten, e com meio deste obter a taxa de infiltração utilizando a equação de Green Ampt. Este por se tratar de uma equação implícita a qual os valores não são obtidos diretamente, foi necessário utilizar o suplemento Solver do Microsoft Excel.

O Solver utiliza o método do Gradiente Reduzido Generalizado (GRG), Não Linear como método de solução para equações implícitas a fim de encontrar um valor ideal conforme restrições ou limites estipulados, orrestringindo os lados da igualdade quando os valores fossem próximos de zero

#### 4.5 TAXA DE INFILTRAÇÃO AJUSTADA

Para obter a taxa de infiltração ajustada dentro da equação de Green- Ampt, a mesma segue os métodos descritos no item 4.4.4, porém ajusta-se valores que melhor expressam a realidade da estimativa da taxa de infiltração deste estudo, ou seja, todos os outros parâmetros são mantidos exceto o  $K_0$  que não segue mais o valor de  $T_{ie}$  encontrado através do ensaio em campo, mas sim a um que melhor se ajuste a equação.

#### 4.6 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Para uma melhor análise da representatividade dos valores obtidos da taxa de infiltração teórica com relação a taxa de infiltração observada este trabalho optou por fazer uso de três parâmetros estatísticos: RMSE – Root Mean Squared Error (raiz do erro quadrático médio), BIAS (Viés), MAE – Mean Absolute Error (erro absoluto médio).

O RMSE para este caso é representado pela fórmula:

Equação (14)

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (f(t)_{teórico} - f(t)_{observado})^2}{n}}$$

Onde:

$f(t)_{teórico}$  = Taxa de infiltração teórica em um tempo x (cm/min);



$f(t)_{\text{observado}}$  = Taxa de infiltração observada no mesmo período (cm/min);  
 $n$  = Número de ensaios realizados.

O RMSE é um parâmetro estatístico amplamente utilizado em estudos climáticos e de meio-ambiente (WILLMOTT, 2005). Valores do RMSE podem variar de zero a mais infinito, sendo o valor 0 o ajuste ideal (MORIASI et al., 2007; LEGATES e MCCABE, 1999). Ainda segundo Willmott (2005), erros grandes possuem relativamente uma maior influência no erro quadrático total do que erros menores.

O MAE é descrito na forma:

Equação (15)

$$\text{MAE} = \frac{\sum_{i=1}^n |f(t)_{\text{teórico}} - f(t)_{\text{observado}}|}{n}$$

Onde valores do MAE podem indicar de uma maneira mais ponderada a performance dos erros encontrados.

O BIAS é representado pela equação:

Equação (16)

$$\text{BIAS} = \frac{\sum_{i=1}^n (f(t)_{\text{teórico}} - f(t)_{\text{observado}})}{n}$$

Valores de BIAS são usualmente utilizados para indicar médias super estimadas ou sub estimadas (WILLMOTT, 2005).

Em suma a utilização desses três métodos tem o propósito de analisar os resultados obtidos pelas taxas de infiltração, vistos que quanto mais próximos de zero esses valores estiverem, melhor se encontram os ajustes destes dados.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 RESULTADOS OBTIDOS PARA OS TEORES DE UMIDADE

Os valores obtidos para o teor de umidade em cada ensaio estão expressos na tabela 4. Os valores referentes ao peso de cada amostra antes e depois de seca na estufa está apresentado no Apêndice A.

Tabela 4- Valores dos teores de umidade

Valores dos Teores de Umidade $\Theta$ (%)				
	$\Theta_1$	$\Theta_2$	$\Theta_3$	$\Theta_{\text{médio}}$
Ensaio 1	29,262	26,617	25,329	26,403
Ensaio 2	31,073	30,050	28,877	30,000
Ensaio 3	11,075	14,581	12,597	12,751
Ensaio 4	15,995	16,110	14,589	15,565
Ensaio 5	20,685	20,077	18,598	19,786
Ensaio 6	21,845	22,558	21,769	22,057
Ensaio 7	29,465	30,279	30,314	30,019
Ensaio 8	27,148	27,381	25,491	26,673

Podemos observar que os valores dos teores de umidade variam bastante, de 11,075% até 31,073%, dependendo do mês e das condições climáticas nos dias ensaiados e do local da realização dos ensaios. Nos ensaios 3 e 4 (data 18/03/2018), foram encontradas as menores taxas de umidades o que já era esperado, pois segundo dados obtidos do CEMADEN na estação pluviométrica do bairro Fraron, não houve ocorrência de precipitação desde o início do mês de janeiro de 2018, logo a ausência de chuva interferiu diretamente nos teores de umidade encontrados.

Por outro lado, os ensaios que tiveram os maiores valores de teor de umidade foram o ensaio 2 e 7 (13/05/2017 e 11/03/2017 respectivamente). Na data da realização do ensaio 7 ocorreu uma precipitação de 0,98mm, e no dia anterior de 12,41 mm. Já no ensaio 2 o valor da precipitação foi de 11,18 mm ocorrida na data do ensaio. Estes dados foram obtidos da estação pluviométrica do bairro Fraron (CEMADEN, 2018). A ocorrência dessas precipitações foram os fatores que fizeram com que os teores de umidades fossem mais elevados.

## 5.2 CLASSIFICAÇÃO DA TEXTURA DO SOLO

Utilizando o método da EMBRAPA (2012) para a análise granulométrica do solo, o qual foi realizado através do laboratório de análises solos da UTFPR, podemos quantificar as porcentagens de argila, areia e silte. Os valores obtidos estão expressos na tabela 5.

Análise Física do Solo		
Argila (%)	Areia (%)	Silte (%)
80,0	4,3	15,7

Comparando as porcentagens encontradas com as do estudo realizado por Tabalipa (2008), pode-se observar porcentagens de areia que variam de 2% até 38%, argila variando de 34% a 82,82% e silte de 7,29% a 41,82%. o estudo foi realizado com coletas de 16 amostras em diferentes pontos no município de Pato Branco, utilizando a classificação de Shepard (1954) o autor classificou o solo variando de argila, argila siltica e areia siltico-argilosa.

O solo deste trabalho foi classificado como muito argiloso segundo o triângulo textural da EMBRAPA (1997), por possuir altos índices de argila e frações muito pequenas de silte e areia comparadas as de argila. Segundo KLEIN (2012) solos de textura argiloso, são solos com teores de argila superiores a 35%. O mesmo autor menciona que esse tipo de solo apresenta maior força de coesão entre as partículas, o que dificulta a penetração de trabalhos de mecanização (escavação, compactação).

Outra composição do solo obtida foi a porcentagem de matéria orgânica, visto que é um parâmetro utilizado para obtenção do valor potencial mátrico, seu valor encontrado foi de 0,245%. Este valor apresenta um valor ínfimo em relação as frações de areia, silte e argila do solo.

## 5.3 POROSIDADE

Outro parâmetro importante para realização deste estudo foi a determinação da porosidade solo, a qual é encontrada através da relação entre a massa específica dos solos e dos sólidos, estes valores encontrados estão apresentados na tabela 6 e 7, respectivamente.

Tabela 6- Massa específica do solo

	Diâmetro (cm)	Altura (cm)	Massa solo (g)	Volume (cm <sup>3</sup> )	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )
Amostra 1	5,0500	3,975	97,660	79,618	1,227
Amostra 2	5,0750	4,070	100,833	82,330	1,225

Optou-se por realizar o ensaio com três amostras para fim de minimizar erros no experimento. O valor da média das mesmas é de: 1,226 g/cm<sup>3</sup>.

Tabela 7- Massa específica dos sólidos

Massa (g)	Volume(cm <sup>3</sup> )	Densidade(g/cm <sup>3</sup> )
20	39	1,818

Segundo KLEIN (2012) os valores de massa específica dos sólidos para solos argilosos deve estar entre 2,2 g/cm<sup>3</sup> e 2,6 g/cm<sup>3</sup>. Comparando os valores obtidos experimentalmente com os do autor citado acima, percebe-se que a massa específica dos sólidos para o solo em questão apresenta-se abaixo do valor esperado para solos argilosos. Van Lier (2010) menciona que valores altos de matéria orgânica no solo, com massa específica em torno de 1200 kg/m<sup>3</sup>, podem contribuir para o abaixamento do valor da massa específica dos sólidos. Porém este valor não se aplica a este trabalho, visto que a fração da matéria orgânica encontrada experimentalmente não é expressiva para influenciar na densidade dos sólidos. A alta porcentagem de argila encontrada no solo (80%) pode ser um fator determinante para o valor de massa específica do solo.

A porosidade foi calculada através da equação 1, a qual apresentou o valor de  $n=32,6\%$ . Segundo VIEIRA (1975) em solos arenosos a densidade dos solos é elevada enquanto que com um solo com partículas mais finas essa densidade é menor, o que faz com que a porosidade em solos argilosos seja maior variando em torno de 40% a 60%.

Segundo Ribeiro (2007) a porosidade do solo depende da forma do arranjo de suas partículas sólidas, se estas estão arranjadas em íntimo contato ocorre predominância de sólidos na amostra de solo e a porosidade total é baixa. O valor obtido de porosidade deste trabalho encontra-se inferior para a porcentagem de silte, argila e areia obtidas. Essa diferença pode ser dada devido ao arranjo das partículas e a alta coesão do solo, pois a área da pesquisa possui terrenos compactados, o que faz com que o volume de vazios seja diminuído, e conseqüentemente afeta o valor da porosidade.

## 5.4 TAXA DE INFILTRAÇÃO TEÓRICA

Para realizar o cálculo da taxa de infiltração utilizando a equação de Green-Ampt-Mein-Larson é necessário obter o potencial mátrico do solo, este que por sua vez é obtido através da equação de Van Genuchten (equação 10), a qual necessita dos parâmetros encontrados pelas equações 11, 12 e 13. Os valores estão apresentados na tabela 8 a seguir.

Tabela 8 - Valores obtidos para o potencial mátrico em diferentes condições de umidade

	$\Theta$ (ad)	$\Theta^*$ (ad)	$\alpha$ (cm <sup>-1</sup> )	$l$ (ad)	$\Psi$ (cm)
Ensaio 1	0,264	0,756	0,000116	0,360	2555,79
Ensaio 2	0,300	0,898	0,000116	0,360	115,537
Ensaio 3	0,127	0,219	0,000116	0,360	13326921,329
Ensaio 4	0,156	0,329	0,000116	0,360	139156,729
Ensaio 5	0,198	0,496	0,000116	0,360	109450,089
Ensaio 6	0,221	0,585	0,000116	0,360	31845,456
Ensaio 7	0,300	0,898	0,000116	0,360	112,834
Ensaio 8	0,267	0,767	0,000116	0,360	2135,176

$\Theta$ = Teor de umidade

$\Theta^*$ = Grau de saturação

$\alpha$ = Parâmetro de Van Genuchten

$l$ = Parâmetro de Van Genuchten

$\Psi$ = Potencial mátrico do solo

Analisando os dados podemos observar valores altos para o potencial mátrico (chegando na ordem de  $10^8$  cm), visíveis nos ensaios 3, 4, 5 e 6. Uma possível explicação para esses valores elevados de potencial mátrico ( $\Psi$ ) é o fato da umidade ser menor que nos demais ensaios visto que ela é um dado muito sensível nessa equação. A medida que os valores de teores de umidade são menores o potencial mátrico do solo tende a aumentar (DINGMAN,2015). Isto explica o fato da discrepância de valores dos ensaios 2 e 7, quando comparado aos demais ensaios, visto que estes apresentam valores maiores de umidade, diminuindo assim o valor do potencial mátrico do solo.

Ainda segundo Digman (2015) o grau de saturação do solo influencia no potencial mátrico, sendo este maior em solos com presença elevada de grãos finos, uma característica encontrada em solos argilosos.

Os parâmetros  $\alpha$  e  $l$  de Van Genuchten variam de acordo com as porcentagens de areia, argila e matéria orgânica do solo, sendo a de argila muito maior quando

comparada a de areia e matéria orgânica. Logo a umidade e a porosidade são os parâmetros que mais possuem influência para determinar o potencial mátrico do solo.

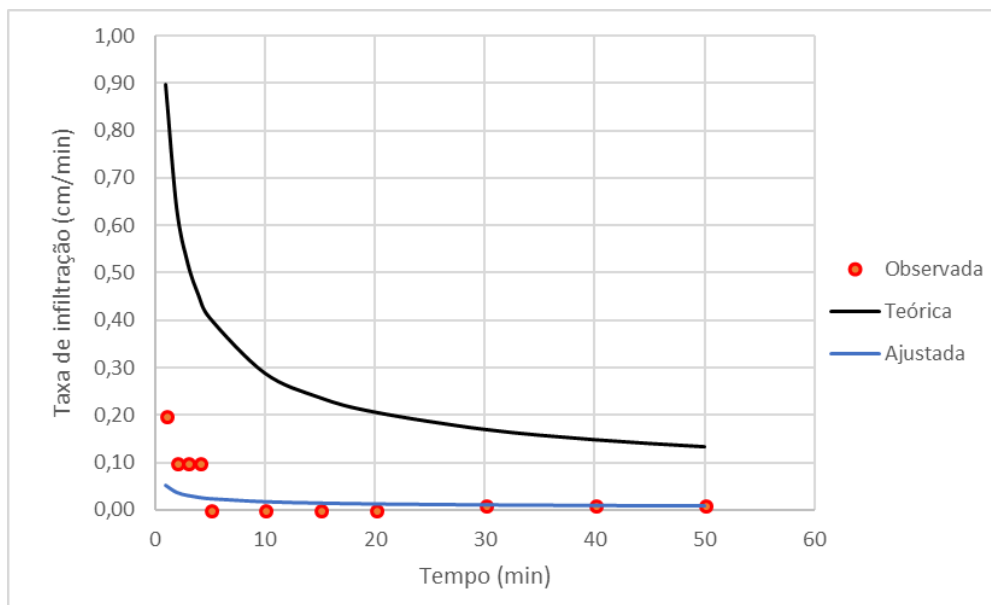
## 5.5 TAXA DE INFILTRAÇÃO E GREEN-AMPT-MEIN-LARSON

Determinados os valores de potencial mátrico do solo para as diferentes condições de umidade e utilizando os valores da condutividade hidráulica obtida pela taxa de infiltração estável encontrada em campo, é possível calcular a taxa de infiltração teórica, utilizando o suplemento computacional SOLVER. o SOLVER resolve equações implícitas restringindo as células a valores muito próximos de zero, fazendo com que a diferença entre os dois lados da equação fossem praticamente nulas, obtendo assim o valor da taxa de infiltração acumulada ( $F(t)$ ). pelo modelo matemático de Green-Ampt-Mein-Larson (GAML), as tabelas referentes a todos os cálculos elaborados par obter tal taxa está apresentada no apêndice A.

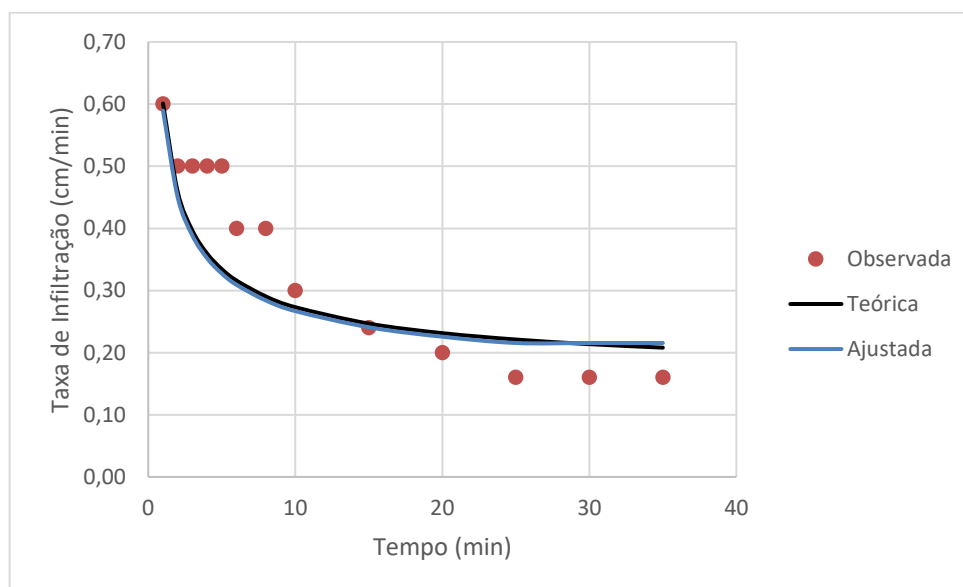
Com o valor da altura de lâmina de água infiltrada no solo em cada intervalo de tempo, é possível calcular a taxa de infiltração para tal solo e assim elaborar um gráfico que descreve seu comportamento ao longo do tempo, esse gráfico gera uma curva a qual se assemelha muito ao comportamento de uma curva exponencial decrescente.

O valor da taxa de infiltração observada é referente aos dados obtidos em campo experimentalmente. Já os da taxa de infiltração ajustada são referentes a ajustes matemáticos feitos no valor da condutividade hidráulica do solo, sendo este aplicado a equação de Green- Ampt. Este ajuste determina qual deveria ser o valor da condutividade hidráulica para qual a taxa de infiltração teórica melhor se aproximasse do valor da taxa de infiltração observada experimentalmente, fazendo que o modelo matemático melhor representasse a realidade em campo.

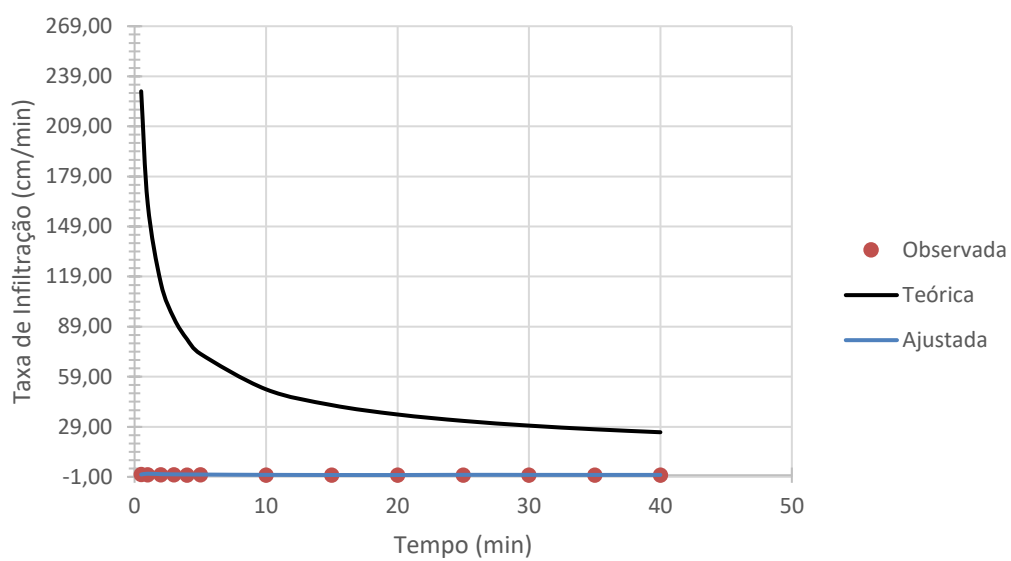
Nas figuras 14 a 21 seguir é possível observar a combinação das três taxas, e como é o comportamento de cada uma delas com diferentes umidades ao longo do tempo.



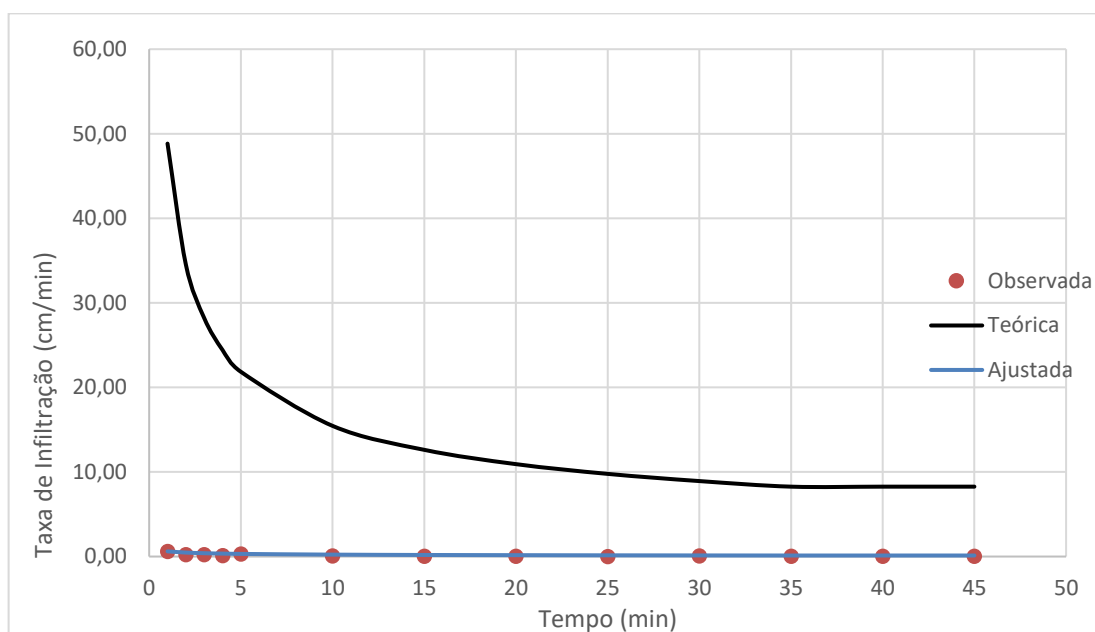
**Figura 14- Curva observada obtida em campo, curva com ajustes na condutividade hidráulica e curva teórica utilizando GAML para o ensaio 1**



**Figura 15-Curva observada obtida em campo, curva com ajustes na condutividade hidráulica e curva teórica utilizando GAML para o ensaio 2.**

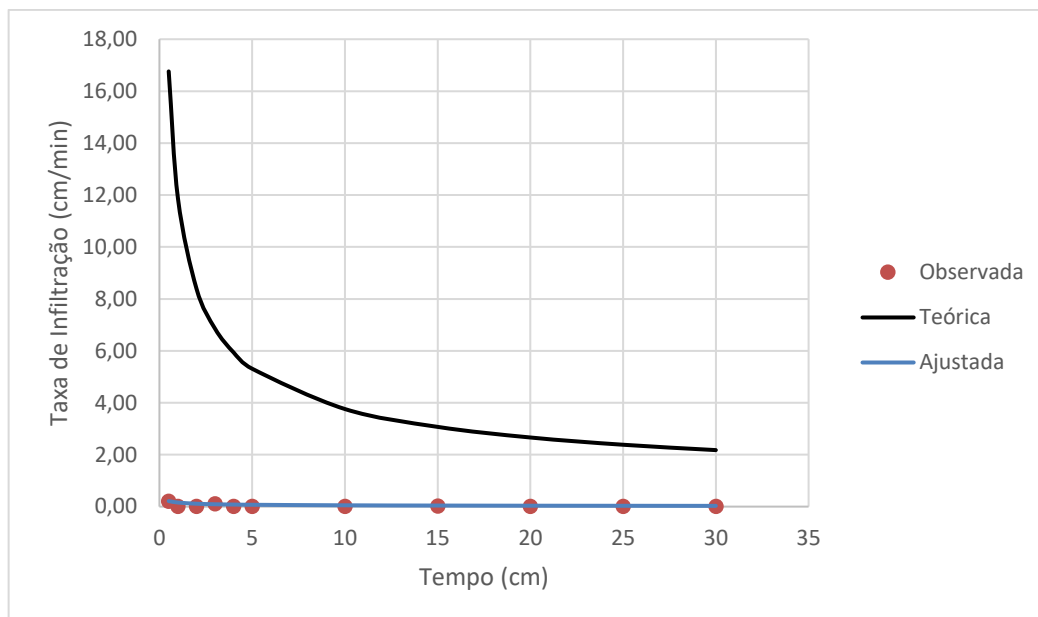


**Figura 16-Curva observada obtida em campo, curva com ajustes na condutividade hidráulica e curva teórica utilizando GAML para o ensaio 3.**

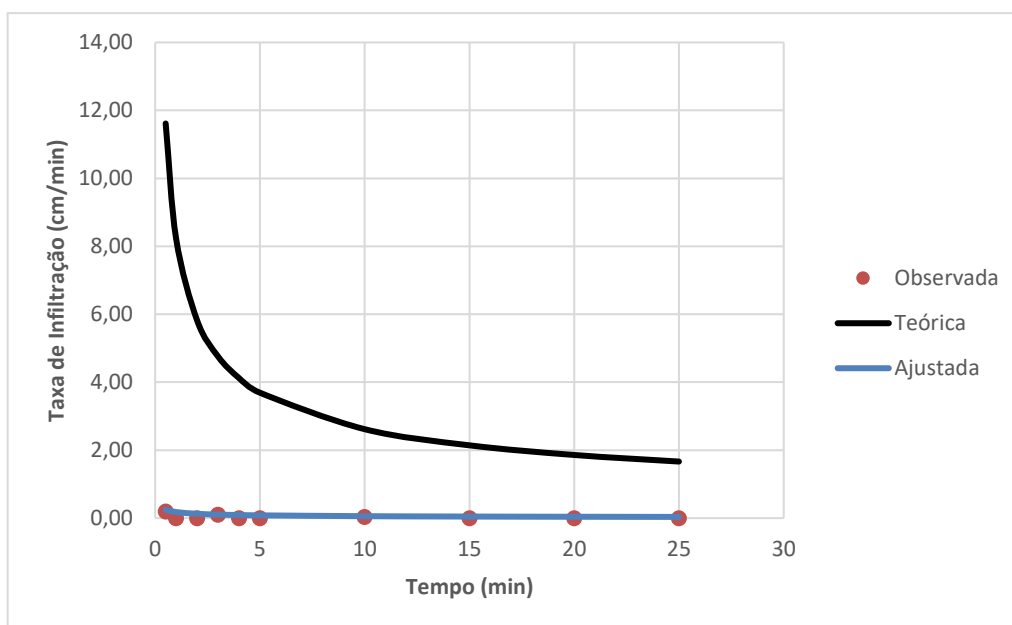


**Figura 17-Curva observada obtida em campo, curva com ajustes na condutividade hidráulica e curva teórica utilizando GAML para o ensaio 4.**

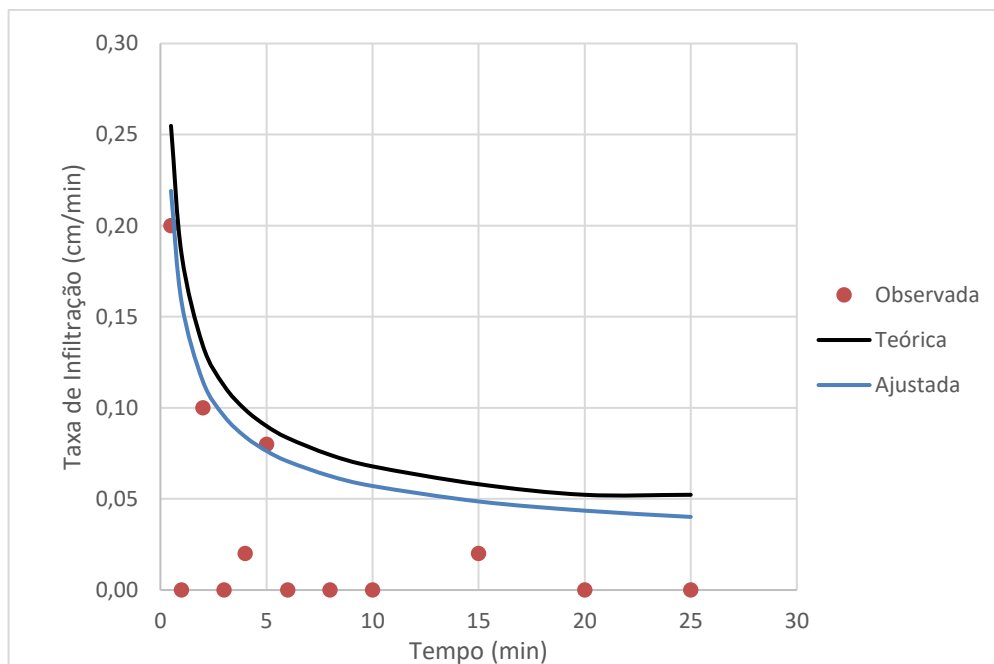




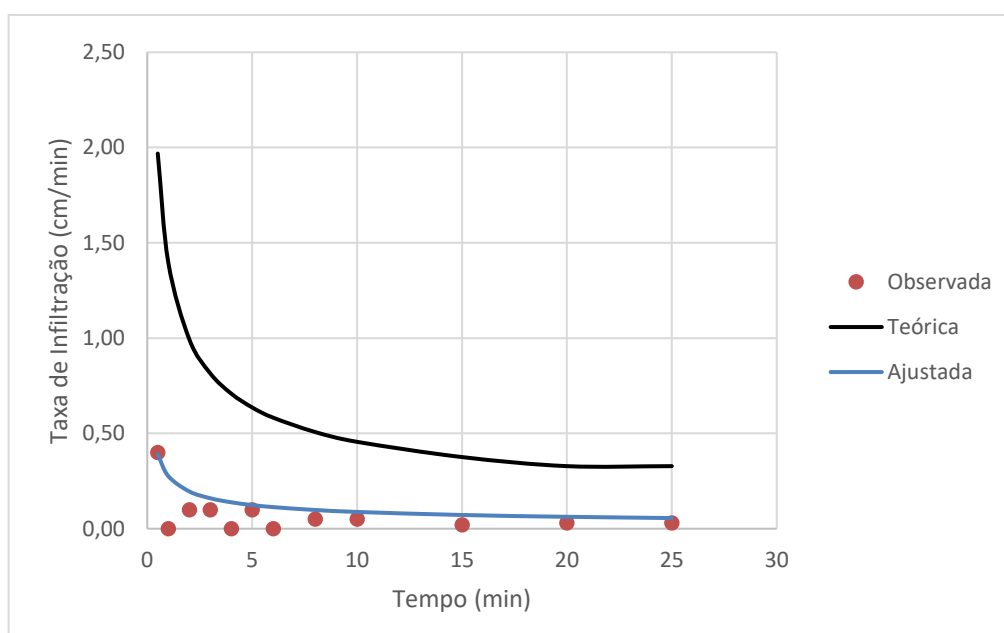
**Figura 18-Curva observada obtida em campo, curva com ajustes na condutividade hidráulica e curva teórica utilizando GAML para o ensaio 5.**



**Figura 19-Curva observada obtida em campo, curva com ajustes na condutividade hidráulica e curva teórica utilizando GAML para o ensaio 6**



**Figura 20-Curva observada obtida em campo, curva com ajustes na condutividade hidráulica e curva teórica utilizando GAML para o ensaio 7.**



**Figura 21-Curva observada obtida em campo, curva com ajustes na condutividade hidráulica e curva teórica utilizando GAML para o ensaio 8.**

Em todos os casos (exceto no ensaio 2) podemos observar valores teóricos superiores ou muito superiores aos valores encontrados em campo. Nos ensaios 1, 2 e 7 os valores de taxa de infiltração teórica e observada encontram-se relativamente próximos. Isto pode estar relacionado principalmente ao fato da condutividade hidráulica, no caso  $T_{ie}$ , dos ensaios 1 e 7 serem na ordem de  $10^{-2}$  cm/min. Visto que ela exerce grande influência sobre os resultados encontrados, aumentando o valor do

potencial mátrico do solo e por sua vez influenciando nos valores da taxa de infiltração calculada pela equação de GAML.

Costa et al. (1999) recomenda que a taxa de infiltração estável ( $T_{ie}$ ) seja determinado utilizando simulador de chuva, pois estudos revelam que valores da  $T_{ie}$  adotados utilizando o método dos anéis concêntricos apresentam valores maiores que os empregados pelos infiltrômetros de aspersão ou simuladores de precipitação (COELHO et al.,2000; COSTA et al.,1999).

Pode-se perceber também a influência da umidade em relação a curva teórica, visto que quanto menor foi a teor de umidade do solo, maior será o valor do seu potencial mátrico (DINGMAN,2015), e conseqüentemente maior será a sua taxa de infiltração, ficando com valores cada vez mais distantes dos encontrados em campo.

A análise dos erros referentes aos ensaios foi calculada pelos métodos RMSE, MAE e BIAS, os valores encontrados estão presentes na tabela 9.

	RMSE (cm/min)	MAE (cm/min)	BIAS (cm/min)
Ensaio 1	0,3664	0,3235	0,3235
Ensaio 2	0,1798	0,0096	0,0096
Ensaio 3	96,9459	76,9119	76,9119
Ensaio 4	27,9696	21,9580	21,9580
Ensaio 5	7,5985	6,2571	6,2571
Ensaio 6	5,4915	4,6176	4,6176
Ensaio 7	0,0822	0,0594	0,0702
Ensaio 8	0,7924	0,6850	0,6850

Observando a tabela 9 pode-se verificar que os mais altos valores de RMSE podem ser encontrados nos ensaios 3, 4 e 5. Estes valores de RMSE quando comparados com os valores do MAE demonstra que a taxa de infiltração teórica está muito longe da observada em campo. Os valores altos do BIAS também demonstram que a taxa de infiltração teórica está sendo superestimada nestes ensaios. Os fatores que estão colaborando com este fato é a baixa umidade encontrada nestes ensaios, também valores da condutividade hidráulica elevados o qual acarreta na elevação do potencial mátrico do solo modificando assim os valores encontrados para taxa de infiltração.

Os ensaios 1, 2 e 7 possuem valores de RMSE baixos em comparação com os outros ensaios. Os ensaios 1 e 7 não possuem tanta discrepância entre os valores de RMSE e do MAE, mostrando que a curva da taxa de infiltração teórica está bem

próxima dos valores encontrados em campo. Para estes dois ensaios o BIAS demonstra que existe um pequeno aumento nos valores teóricos encontrados em comparação com os observados.

Especificamente no ensaio 2 pode-se observar uma diferença maior entre os valores de RMSE e do MAE, o que pode indicar que pontos específicos no gráfico podem estar gerando um aumento no valor do RMSE. Isto fica claro quando olhamos para figura 15, onde valores da taxa de infiltração encontrados em campo no começo do ensaio se destoam dos valores teóricos obtidos.

## 6 CONCLUSÃO

O objetivo deste trabalho foi estimar a taxa de infiltração ( $f(t)$ ) para um solo argiloso sob diferentes condições de umidade ( $\Theta$ ) para o município de Pato Branco-PR. A taxa de infiltração foi medida em campo utilizando-se anéis concêntricos, os ensaios de porosidade, umidade e textura do solo foram feitos em laboratórios, seguindo as normas estipuladas. Foram obtidas três curvas para a mesma condição de umidade, sendo a curva observada referentes aos valores coletados em campo, e as demais encontradas pela equação de Green-Ampt-Mein-Larson (GAML).

Os parâmetros necessários para a elaboração da taxa de GAML foram calculados, sendo possível estimar a curva teórica e a com condutividade hidráulica ajustada ( $K_0$ ). O ensaio que melhor se ajustou aos dados esperados foi o ensaio 2, visto que as três curvas apresentaram valores próximo uma das outras, o que se confirmou na análise dos erros pelo método do RMSE e MAE, que apresentaram valores próximos de 0, indicando a confiabilidade dos resultados.

O valor da taxa de infiltração de água no solo depende da umidade encontrada, a qual vai determinar em qual tempo o solo irá atingir totalmente a sua saturação. A capacidade de absorção da água depende da textura do solo, do arranjo das partículas dos grãos, da porosidade e da umidade encontrada. A variação da umidade para um solo que possui as mesmas características físicas está relacionada a fatores climáticos. A porosidade ( $n$ ), encontrada que corresponde aos espaços vazios do solo, que podem ser preenchidos por água foi de 32,6%, não sendo obtido nenhum valor de umidade ( $\Theta$ ) superior a esta porcentagem.

Constata-se que quanto maior é a umidade do solo melhores são os resultados para a equação de GAML, ou seja, quanto maior é o teor de umidade mais próximo os valores experimentais se aproximam dos teóricos. No caso de baixas umidades não podemos afirmar que a equação é válida, pois os valores divergem, ocasionando a superestimação da curva teórica.

A taxa de infiltração teórica ajustada possui ajustes referentes a condutividade hidráulica do solo, expressando resultados próximos dos valores obtidos experimentalmente, o qual fica visível nos gráficos apresentados. Valores de condutividade hidráulica na ordem de grandeza de  $10^{-4}$  (cm/min), melhor ajustam-se na equação de GAML, representando a realidade do solo estudado.

A escolha dos anéis concêntricos para estimar a taxa de infiltração estável ( $T_{ie}$ ), foi um fator que elevou a ordem de grandeza da condutividade hidráulica do solo, não apresentando bons resultados quando inseridos na equação de GAML. Como proposta para futuros trabalho sugere-se a realização da medição da condutividade hidráulica em campo utilizando simuladores de chuva, visto que este é um parâmetro sensível e essencial para a equação de GAML, podendo assim apresentar resultados melhores que os encontrados neste trabalho.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. **NBR 6457:1986** - Amostras de Solo – Preparação para ensaio de compactação e ensaios de caracterização.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D3385: Standar Test Method for Infiltration Rate of Soils in Field Using Double-Ring Infiltrometer**. Pensilvânia, 2003.

AN VAN DEN PUTTE; GOVERS, G.; LEYS, A.; LANGHANS, C.; Clymans, W.; DIELS, J. **Estimating the parameters of the Green-Ampt infiltration equation from rainfall simulation data: Why simpler is better**. Journal of Hydrology, v. 476, n.7, pp. 332-344, 2013.

BERTHELOT, R. **Curso de Hidrologia Sintética**. Mestrado em hidrologia aplicada, IPH – UFRGS, 1970.

CAPUTO, P. H. **Mecânica dos Solos e suas Aplicações**. 6ª Ed, Rio de Janeiro, 1988.

CECÍLIO, R.A. **Aplicação da equação de Green-Ampt na modelagem da infiltração da água em Latossolo Vermelho-Amarelo estratificado**. Tese do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola – Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, MG, 2002. Disponível em: <<http://www.locus.ufv.br/handle/123456789/9439>>. Acesso em: 14 de maio de 2018

CECÍLIO, R.A. **Modelagem da infiltração da água no solo fundamentada na equação de Green-Ampt-Mein-Larson**. Tese do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola – Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, MG, 2005. Disponível em: <<http://www.locus.ufv.br/handle/123456789/9761>>. Acesso em: 14 de maio de 2018.

CENAD. **Anuário brasileiro de desastres naturais: 2013**. Centro Nacional de Gerenciamento de Riscos e Desastres. Brasília, 2014. 84 p. Disponível em <<http://www.mi.gov.br/defesacivil/publicacoes>>. Acesso em: 05 jun. 2017.

CORRADINI, C.; MORBIDELLI, R.; SALTALIPPI, C. **Flood forecasting and infiltration modelling**. Hydrological Sciences Journal, v. 49, n. 2, pp. 227-236, 2004.

COELHO, R.D; MIRANDA, J.H.; DUARTE, S.N. **Infiltração de água no solo: Parte I. Infiltrômetro de anéis versus infiltrômetro de aspersores**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.4, n.2, 2000.

COSTA, É.L.; SILVA, A.M.; COLOMBO, A.; ABREU, A.R. **Infiltração de água em solo, determinada por simulador de chuvas e pelo método dos anéis**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.3, n.2, 1999.

CRAWFORD, M. LINSLEY, R. **Digital Simulation in Hydrology**. Technical Report n. 39, Department of Civil Engineer, Stanford University, 1966.

DINGMAN, L.S. **Physical Hydrology**. 3ª Ed. Waveland Press. 2015. 643 p.

ECKHARDT, R. R. **Geração de modelo cartográfico aplicado ao mapeamento das áreas sujeitas às inundações urbanas na cidade de Lajeado / RS**. Dissertação do Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto do Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto – UFRGS. Porto Alegre, RS. 2008. Disponível em: < <http://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/13755>>. Acesso em: 05 jun. 2017.

EMBRAPA. **Manual de Métodos de Análise de Solo**. Centro Nacional de Pesquisas de Solos. Rio de Janeiro, 1997. Disponível em: <[https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/Manual+de+Metodos\\_000fzvhotqk02wx5ok0q43a0ram31wtr.pdf](https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/Manual+de+Metodos_000fzvhotqk02wx5ok0q43a0ram31wtr.pdf)>. Acesso em: 05 jun. 2017.

EMBRAPA. **Padronização de Métodos para Análise Granulométrica no Brasil**. Comunicado Técnico 66, Centro Nacional de Solos Rio de Janeiro, 2012.

FENICIA, F.; KAVETSKI, D.; SAVENIJE, H.H.G. **Elements of a flexible approach for conceptual hydrological modeling: 1. Motivation and theoretical development**. Water Resources Research, v.47, pp. 1–13, 2011.

GREEN, W.H.; AMPT, G. **Studies in soil physics. I: The flow of air and water through soils**. Journal of Agriculture. Science, v.4, pp.1–24, 1911.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Consulta de área, população e dados dos municípios**. Disponível em: < <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pr/pato-branco/panorama> > Acesso em: 8 de junho de 2018.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Perfil dos Municípios Brasileiros- MUNIC**. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/economia/perfilmunic/2013/default.shtm>>. Acesso em: 05 jun. 2017.

KLEIN, V. A. **Física do Solo**. 2ª ed. Passo Fundo: Ed. Universidade de Passo Fundo, 2012.

KOENE, R. **A relação entre as inundações e as características geomorfológicas da cidade de Rio Negro/PR**. Geografia Ensino & Pesquisa. Set/Jan de 2013. p.175-190, v.17. n.3. Disponível em: <<https://periodicos.ufsm.br/geografia/article/view/8210>>. Acesso em: 05 jun. 2017.

LEPSCH, Igo F. **Formação e Conservação Dos Solos**. Oficina de Textos. São Paulo. 2002.



LEGATES, D. R.; MCCABE, G. J. **evaluation the use of “goodness-of-fit” measures in hydrologic and hydroclimatic model validation.** Water Resour. Res., 35 (1999), pp. 233-241.

LIBARDI, P.L. **Dinâmica da Água no Solo.** 2ª ed. São Paulo: EDUSP,2012.

MAIA, C.E. **Índice S para avaliação da qualidade física de solos.** R. Bras. Ci. Solo, 35:1959-1965, 2011.

MASSARI, C.; BROCCA, L.; BARBETTA, S.; PAPATHANASIOU, C.; MIMIKOU, M.; MOR, T. **Using globally available soil moisture indicators for flood modelling in Mediterranean catchments.** Hydrology and Earth System Sciences, v. 10, n. 10, pp. 997-11, 2013.

MEIN, R. G. LARSON, C. L. **Modeling infiltration during a steady rain.** Water Resources Research, v. 9, n. 2, 1973.

MELO, C.R, A.M.S. **Hidrologia: Princípios e Aplicações em Sistemas Agrícolas- 1º.** Ed, 2013.

MELLO, L.T.A. **Avaliação de metodologias para obtenção dos parâmetros do modelo de Green- Ampt modificado por Mein e Larsson,** 2003. Dissertação mestrado. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa- MG.

MORIASI, D. N.; ARNOLD, J. G.; VAN LIEW, M. W.; BINGNER, R. L.; HARMEL, R. D.; VEITH T. L. **Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations.** Tans. ASABE, 50 (2007), pp 885-900.

PARCHEN, C. A. P. **Desenvolvimento de Metodologia para Mensuração de Alguns Parâmetros de Processos Hidrológicos de Superfície em Ambiente Florestal.** Tese do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal – Universidade Federal do Paraná. Curitiba, PR, 2007. Disponível em: < [http://www.floresta.ufpr.br/defesas/pdf\\_dr/2007/t228\\_0231-D.pdf](http://www.floresta.ufpr.br/defesas/pdf_dr/2007/t228_0231-D.pdf)>. Acesso em: 20 de maio de 2018.

PAZ, V.P; OLIVEIRA, A.S. **Infiltração de água no solo.** UNIVERSIDADE FEDERAL DE RECÔNCAVO DA BAHIA/NEAS- Núcleo de Engenharia de Água e solo. 2006. Disponível em:< <http://www.neas.ufba.br/downloads.html>.> Acessado em 30 de março de 2018.

PORTO, R. L.; KAMUEL, Z. F.; TUCCI, C. E. M.; BIDONE, Francisco. **Drenagem Urbana.** In: TUCCI, Carlos E. M.; SILVEIRA, André L. L. da. **Hidrologia: Ciência e Aplicação.** 4ª ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, ABRH, 2009.

PREFEITURA DE PATO BRANCO, 2018. **Relevo e hidrografia.** Disponível em : < <http://www.patobranco.pr.gov.br/omunicipio/relevo-e-hidrografia/>>. Acesso em 8 de junho de 2018.

RIBEIRO, K.D.; MENEZES, S.M.; MESQUITA, M.G.B.F; SAMPAIO, F.M.T. **Propriedades físicas do solo, influenciadas pela distribuição de poros, de seis classes de solos da região de Lavras- MG.** Ciênci. Agrotec. Lavras- MG, V. 31, nº4, 2007.

ROGELIS, M.C.; WERNER, M.; OBREGÓN, N.; WRIGHT, N. **Hydrological model assessment for flood early warning in a tropical high mountain basin.** Hydrology and Earth System Sciences Discussion, 2016.

SAYÃO, L. F. **Modelos teóricos em ciência da informação – abstração e método científico.** Ciência da Informação, Brasília, v. 30, n. 1, p. 82-91, jan./ abr. 2001.

SCS. **Urban Hydrology for Small Watersheds.** Washington. U.S. dept. Agr. Technical Release, n. 55, 1975.

SILVA, Alexandre Chistófar, TORRADO, Pablo Vidal, ABREU JUNIOR, José de Souza. **Métodos de Quantificação da Matéria Orgânica do Solo** UNIFENAS, 1999. Disponível em <[http://www.unifenas.br/pesquisa/download/ArtigosRev1\\_99/pag21-26.pdf](http://www.unifenas.br/pesquisa/download/ArtigosRev1_99/pag21-26.pdf)>. Acessado em 25 de Abril de 2018.

SILVA, Edna Lúcia da, MENEZES, Estera Muszkat. **Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação.** 4ª. ed. Florianópolis: UFSC, 2005.

TABALIPA, Ney Lyzandro. **Estudo da estabilidade de vertentes da bacia do Rio Ligeiro, Pato Branco, Paraná.** Tese de Doutorado em Geologia Ambiental – Universidade Federal do Paraná. Curitiba, PR, 2008.

TEIXEIRA, Wilson. FAIRCHILD, Thomas Rich. TOLEDO, M. Cristina Motta de. TAIOLI, Fabio. **Decifrando a Terra – 2ª edição.** Companhia Editora Nacional. São Paulo. 2009.

TUCCI, Carlos E. M. **Modelos hidrológicos.** 2ª. Ed. Porto Alegre: UFRGS, ABRH, 2005.

TUCCI, Carlos E. M. **Hidrologia- Ciências e aplicações.** 4ª. Ed. Porto Alegre: UFRGS, ABRH, 2009.

TWARAKAVI, N.K.C, J. Simunek, and M.G. Schaap (2010). **Can texture based classification optimally classify soils with respect to soil hydraulics?** Water Resoucs Research 46: W01501, doi: 10.1029/2009WR007939.

UNAMA - Universidade da Amazônia. **Apostila de Hidrologia Aplicada.** Belém, 2009.

VIEIRA, L.S. **Manual da ciência do solo.** 1ª Ed, São Paulo, CERES, 1975.

WILLMOTT, C.J.; MATSUURA, K. **Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance.** Center for Climatic Research, Dept. of Geography, University of Delaware. Delaware, USA, 2005.

ZONTA, João Henrique. **Avaliação do modelo de Green-Ampt-Mein-Larson em condições de campo**. Dissertação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola – Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, MG, 2007. Disponível em: <<http://www.locus.ufv.br/handle/123456789/3692>>. Acesso em: 14 de maio de 2018.

## APÊNDICE A- TABELAS COM OS RESULTADOS OBTIDOS

### POROSIDADE

Tabela 10-Valores obtidos para densidade do solo

Densidade do Solo					
	Diâmetro (cm)	Altura (cm)	Massa solo (g)	Volume (cm <sup>3</sup> )	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )
Amostra 1	5,0500	3,975	97,660	79,618	1,227
Amostra 2	5,0750	4,070	100,833	82,330	1,225

Tabela 11-Valor obtido para densidade dos sólidos

Densidade dos Sólidos		
Massa (g)	Volume(cm <sup>3</sup> )	Densidade(g/cm <sup>3</sup> )
20	39	1,818

Tabela 12-Resultado encontrado para porosidade do solo

Porosidade (%)	
Amostra 1	0,325
Amostra 2	0,326
Média	0,326

### ENSAIO 1- Dados obtidos

Tabela 13- Teor de umidade para o ensaio 1

Teor de umidade			
	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3
Peso p.alm (g)	0,34	0,31	0,44
Peso úmido (g)	208,43	175,10	205,34
Peso seco (g)	181,17	158,38	185,38
Teor de umidade (%)	29,262	24,617	25,329
Média (%)	26,40		

Tabela 14-Dados para o potencial mátrico para o ensaio 1

Equação de Van Genuchten	
Porosidade (%)	0,326
Umidade (ad)	0,264
Umidade Residual (ad)	0,072
$\Theta$ (ad)	0,756
Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> )	1,818
Argila (%)	80,000
Silte (%)	15,700
Areia (%)	4,300
Matéria Orgânica (%)	0,245
$\alpha$ (cm <sup>-1</sup> )	0,000116
l (ad)	0,360
$\Psi$ (cm)	2555,790
k (cm/min)	0,010
$\Delta\Theta$	0,062
k ajustado (cm/min)	0,00055

Tabela 15-Taxa de infiltração observada para o ensaio 1

Taxa de Infiltração Observada				
Tempo (min)	Tempo acum. (min)	Altura Lâmina (cm)	Diferença (cm)	Taxa de infiltração (cm/min)
0	0	17,00	0,00	0,00
1	1	16,80	0,20	0,20
1	2	16,70	0,10	0,10
1	3	16,60	0,10	0,10
1	4	16,50	0,10	0,10
1	5	16,50	0,00	0,00
5	10	16,50	0,00	0,00
5	15	16,50	0,00	0,00
5	20	16,50	0,00	0,00
10	30	16,40	0,10	0,01
10	40	16,30	0,10	0,01
10	50	16,20	0,10	0,01

Tabela 16-Taxa de infiltração teórica para o ensaio 1

Taxa de Infiltração Teórica				
Tempo (min)	F(t) (cm)	Lado Direito F(t)	Diferença	f(t) (cm/min)
1	1,786408433	1,786409022	-0,0000006	0,89659636
2	2,53032976	2,530330105	-0,0000003	0,635935497
3	3,102690271	3,102690768	-0,0000005	0,520467716
4	3,586264181	3,586264821	-0,0000006	0,451635957
5	4,013099155	4,013099931	-0,0000008	0,404663365
10	5,695036189	5,695036598	-0,0000004	0,288105909
15	6,993438041	6,993438592	-0,0000006	0,23647276
20	8,093329487	8,093330157	-0,0000007	0,205694889
30	9,949313363	9,949313725	-0,0000004	0,169189198
40	11,52459463	11,52459504	-0,0000004	0,147429842
50	12,92051802	12,92051826	-0,0000002	0,132582021

Tabela 17-Taxa de infiltração ajustada para o ensaio 1

Taxa de Infiltração Ajustada				
Tempo (min)	F(t) (cm)	Lado Direito F(t)	Diferença	f(t) (cm/min)
1	0,418060339	0,418059559	0,0000008	0,208917713
2	0,590898993	0,590899452	-0,0000005	0,147969911
3	0,723962351	0,723962767	-0,0000004	0,120874319
4	0,836157679	0,836158227	-0,0000005	0,104729246
5	0,935047452	0,935048131	-0,0000007	0,093711343
10	1,323539526	1,32353999	-0,0000005	0,066366151
15	1,622010062	1,622010748	-0,0000007	0,05425514
20	1,87392109	1,873921992	-0,0000009	0,047035563
30	2,297159955	2,297160422	-0,0000005	0,038470858
40	2,654502482	2,654503095	-0,0000006	0,033366046
50	2,969765809	2,969766563	-0,0000008	0,029882372

## ENSAIO 2- Dados obtidos

Tabela 18-Teor de umidade para o ensaio 2

Teor de umidade			
	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3
Peso p.alm (g)	0,47	0,39	0,41
Peso úmido (g)	186,25	172,78	183,83
Peso seco (g)	144,87	132,05	141,73
Teor de umidade (%)	28,888	31,140	29,994
Média (%)		30,007	

Tabela 19-Dados para o potencial mátrico para o ensaio 2

Equação Van Genuchten	
Porosidade (%)	0,326
Umidade (ad)	0,300
Umidade Residual (ad)	0,072
$\Theta$ (ad)	0,898
Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> )	1,818
Argila (%)	80,000
Silte (%)	15,700
Areia (%)	4,300
Matéria Orgânica (%)	0,245
$\alpha$ (cm <sup>-1</sup> )	0,000116
$l$ (ad)	0,360
$\Psi$ (cm)	115,537
$k$ (cm/min)	0,160
$\Delta\Theta$	0,026
$k$ ajustado (cm/min)	0,15500

Tabela 20-Taxa de infiltração observada para o ensaio 2

Taxa de Infiltração Observada				
Tempo (min)	Tempo acum (min)	Altura Lâmina (cm)	Dif. (cm)	Taxa de infiltração (cm/min)
0	0	18,00	0,00	0,00
0,5	0,5	17,90	0,10	0,20
0,5	1	17,60	0,30	0,60
1	2	17,10	0,50	0,50
1	3	16,60	0,50	0,50
1	4	16,10	0,50	0,50
1	5	15,60	0,50	0,50
1	6	15,20	0,40	0,40
2	8	14,40	0,80	0,40
2	10	13,80	0,60	0,30
5	15	12,60	1,20	0,24
5	20	11,60	1,00	0,20
5	25	10,80	0,80	0,16
5	30	10,00	0,80	0,16
5	35	9,20	0,80	0,16

Tabela 21-Taxa de infiltração teórica para o ensaio 2

Taxa de Infiltração Teórica				
Tempo (min)	F(t) (cm)	Lado Direito F(t)	Diferença	f(t) (cm/min)
0,5	0,747603101	0,74760332	-0,0000002	0,802897177
1	1,089882515	1,089883177	-0,0000007	0,600994251
2	1,607598173	1,607599694	-0,0000015	0,458975161
3	2,032152431	2,032154027	-0,0000016	0,396513716
4	2,408823312	2,408826321	-0,0000030	0,359529754
5	2,755104525	2,755106436	-0,0000019	0,33445143
6	3,079922761	3,079927585	-0,0000048	0,316053239
8	3,684535791	3,684539955	-0,0000042	0,29044572
10	4,247147475	4,247154928	-0,0000075	0,273165819
15	5,540008584	5,540017766	-0,0000092	0,24675653
20	6,732480291	6,732484139	-0,0000038	0,231390023
25	7,862257537	7,862267337	-0,0000098	0,221131542
30	8,948464867	8,948470415	-0,0000055	0,213711104
35	10,00228814	10,00229142	-0,0000033	0,208052197

Tabela 22-Taxa de infiltração ajustada para o ensaio 2

Taxa de Infiltração Ajustada				
Tempo (min)	F(t) (cm)	Lado Direito F(t)	Diferença	f(t) (cm/min)
0,5	0,193884036	0,265383937	-0,0714999	2,556498258
1	1,070983693	1,070983596	0,0000001	0,589751881
2	1,578747932	1,578747695	0,0000002	0,449924963
3	1,994777376	1,994777303	0,0000001	0,388415609
4	2,36365298	2,363652765	0,0000002	0,351988382
5	2,702587454	2,702587622	-0,0000002	0,327283851
6	3,020386209	3,020386263	-0,0000001	0,309156503
8	3,611605784	3,611605561	0,0000002	0,283921096
10	4,161435167	4,161434911	0,0000003	0,266887403
15	5,42392384	5,42392401	-0,0000002	0,240844158
20	6,587379345	6,587379674	-0,0000003	0,22568246
25	7,688980366	7,688979032	0,0000013	0,215555776
30	7,688979132	7,688979032	0,0000001	0,215555776
35	7,688979132	7,688979032	0,0000001	0,215555776



## ENSAIO 3- Dados obtidos

Tabela 23-Teor de umidade para o ensaio 3

Teor de umidade			
	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3
Peso p.alm (g)	0,475	0,393	0,455
Peso úmido (g)	219,765	253,764	207,092
Peso seco (g)	197,853	221,472	183,923
Teor de umidade (%)	11,075	14,581	12,597
Média		12,751	

Tabela 24-Dados para o potencial mátrico para o ensaio 3  
Equação Van Genuchten

Porosidade (%)	0,326
Umidade (ad)	0,128
Fator f (ad)	1,128
Umidade Residual (ad)	0,072
$\Theta$ (ad)	0,219
Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> )	1,818
Argila (%)	80,000
Silte (%)	15,700
Areia (%)	4,300
Matéria Orgânica (%)	0,245
$\alpha$ (cm <sup>-1</sup> )	0,000116
l (ad)	0,360
$\Psi$ (cm)	13326921,329
k (cm/min)	0,020
$\Delta\Theta$	0,198
k ajustado(cm/min)	0,0000002

Tabela 25-Taxa de infiltração observada para o ensaio 3

Taxa de Infiltração Observada				
Tempo (min)	Tempo Acum.(min)	Altura Lâmina (cm)	Diferença (cm)	Velocidade de infiltração (cm/min)
0	0	19,00	0,00	0,00
0,5	0,5	18,80	0,20	0,40
0,5	1	18,70	0,10	0,20
1	2	18,60	0,10	0,10
1	3	18,50	0,10	0,10
1	4	18,50	0,00	0,00
1	5	18,40	0,10	0,10
5	10	18,10	0,30	0,06
5	15	17,80	0,30	0,06
5	20	17,50	0,30	0,06
5	25	17,30	0,20	0,04
5	30	17,20	0,10	0,02
5	35	17,10	0,10	0,02
5	40	17,00	0,10	0,02

Tabela 26-Taxa de infiltração teórica para o ensaio 3

Taxa de Infiltração Teórica				
Tempo (min)	F(t) (cm)	Lado Direito F(t)	Diferença	f(t) (cm/min)
0,5	230,0191635	230,0191634	0,0000001	230,0234983
1	325,2993052	325,2993051	0,0000001	162,6554912
2	460,049927	460,0499268	0,0000001	115,0188495
3	563,4508927	563,4508926	0,0000001	93,91498353
4	650,6240666	650,6240665	0,0000001	81,33456398
5	727,4267628	727,4267627	0,0000001	72,74926292
10	1028,775589	1028,775589	0,0000001	51,44541568
15	1260,024221	1260,024221	0,0000001	42,00745659
20	1454,986313	1454,986313	0,0000001	36,38131269
25	1626,759304	1626,759304	0,0000001	32,54184399
30	1782,060355	1782,060355	0,0000002	29,70766582
35	1924,879775	1924,879775	0,0000002	27,50494372
40	2057,817465	2057,817465	0,0000002	25,72938054

Tabela 27-Taxa de infiltração ajustada para o ensaio 3

Taxa de Infiltração Ajustada				
Tempo (min)	F(t) (cm)	Lado Direito F(t)	Diferença	f(t) (cm/min)
0,5	1,228949098	1,228948912	0,0000002	0,430491686
1	0,608461649	0,608461779	-0,0000001	0,869491521
2	0,859075269	0,859075529	-0,0000003	0,615839279
3	1,051570925	1,051571316	-0,0000004	0,503106658
4	1,21391809	1,213918612	-0,0000005	0,435822128
5	1,356980486	1,356981137	-0,0000007	0,389874725
10	2,675409691	2,675410337	-0,0000006	0,197746409
15	4,461720557	4,461719794	0,0000008	0,118576009
20	4,987971324	4,987970621	0,0000007	0,10606579
25	2,349379347	2,349383304	-0,0000040	0,225188237
30	2,712705474	2,712710083	-0,0000046	0,195027684
35	3,032811878	3,03281714	-0,0000053	0,174442976
40	3,03281624	3,03281714	-0,0000009	0,174442976

## ENSAIO 4- Dados obtidos

Tabela 28-Teor de umidade para o ensaio 4

Teor de umidade			
	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3
Peso p.alm (g)	0,410	0,448	0,463
Peso úmido (g)	183,85	202,278	252,413
Peso seco (g)	158,498	174,212	220,276
Teor de umidade (%)	15,995	16,110	14,589
Média		15,565	

Tabela 29-Dados para o potencial mátrico para o ensaio 4

Equação Van Genuchten	
Porosidade (%)	0,326
Umidade (ad)	0,156
Fator f (ad)	1,128
Umidade Residual (ad)	0,072
$\Theta$ (ad)	0,329
Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> )	1,818
Argila (%)	80,000
Silte (%)	15,700
Areia (%)	4,300
Matéria Orgânica (%)	0,245
$\alpha$ (cm <sup>-1</sup> )	0,000116
l (ad)	0,360
$\Psi$ (cm)	1399156,729
k (cm/min)	0,020
$\Delta\Theta$	0,170
k ajustado(cm/min)	0,0000045

Tabela 30- Taxa de infiltração observada para o ensaio 4

Taxa de Infiltração Observada				
Tempo (min)	Tempo acumulado (min)	Altura Lâmina (cm)	Diferença (cm)	Velocidade de infiltração (cm/min)
0	0	17,00	0,00	0,00
0,5	0,5	16,80	0,20	0,40
0,5	1	16,50	0,30	0,60
1	2	16,30	0,20	0,20
1	3	16,10	0,20	0,20
1	4	16,00	0,10	0,10
1	5	15,70	0,30	0,30
5	10	15,50	0,20	0,04
5	15	15,40	0,10	0,02
5	20	15,30	0,10	0,02
5	25	15,30	0,00	0,00
5	30	15,10	0,20	0,04
5	35	15,00	0,10	0,02
5	40	14,90	0,10	0,02
5	45	14,80	0,10	0,02

Tabela 31-Taxa de infiltração teórica para o ensaio 4

Taxa de Infiltração Teórica				
Tempo (min)	F(t) (cm)	Lado Direito F(t)	Diferença	f(t) (cm/min)
0,5	69,05304373	69,05304273	0,0000010	69,05282921
1	97,65721629	97,6572153	0,0000010	48,83284923
2	138,1142442	138,1142432	0,0000010	34,53437613
3	169,1613485	169,1613475	0,0000010	28,19976457
4	195,3374394	195,3374384	0,0000010	24,42355003
5	218,4006628	218,4006619	0,0000010	21,84652247
10	308,9034673	308,9034664	0,0000009	15,45176908
15	378,364332	378,3643311	0,0000009	12,6187747
20	436,9330529	436,933052	0,0000009	10,92997109
25	488,5410847	488,5410838	0,0000008	9,777474088
30	535,2047201	535,2047192	0,0000008	8,926735677
35	578,1217307	578,1217299	0,0000008	8,265541935
40	578,1220605	578,1217299	0,0003305	8,265537233
45	578,1220605	578,1217299	0,0003305	8,265537233

Tabela 32- Taxa de infiltração ajustada para o ensaio 4

Taxa de Infiltração Ajustada				
Tempo (min)	F(t) (cm)	Medido	Diferença	f(t) (cm/min)
0,5	2,237239301	2,237231051	0,0000082	0,479416143
1	1,745551098	1,745549206	0,0000019	0,614457191
2	2,285516107	2,285514149	0,0000020	0,469289563
3	2,71050956	2,710507648	0,0000019	0,395708166
4	3,086379033	3,08637705	0,0000020	0,347518061
5	3,415164557	3,41516259	0,0000020	0,314062154
10	4,728960364	4,728958451	0,0000019	0,22681092
15	5,71436599	5,71436499	0,0000010	0,187699613
20	6,586338108	6,586337107	0,0000010	0,162850463
25	7,355661309	7,355660309	0,0000010	0,145818523
30	8,051811213	8,051810213	0,0000010	0,133211618
35	8,6923901	8,6923891	0,0000010	0,123395024
40	8,692391138	8,6923891	0,0000020	0,123395024
45	8,692391138	8,6923891	0,0000020	0,123395024

## ENSAIO 5- Dados obtidos

Tabela 33- Teor de umidade para o ensaio 5

Teor de umidade			
	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3
Peso p.alm (g)	0,475	0,448	0,463
Peso úmido (g)	246,324	229,404	257,586
Peso seco (g)	204,105	191,048	217,193
Teor de umidade (%)	20,685	20,077	18,598
Média		19,786	

Tabela 34- Dados para o potencial mátrico para o ensaio 5

Equação Van Genuchten	
Porosidade (%)	0,326
Umidade (ad)	0,198
Umidade Residual (ad)	0,072
$\Theta$ (ad)	0,496
Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> )	1,818
Argila (%)	80,000
Silte (%)	15,700
Areia (%)	4,300
Matéria Orgânica (%)	0,245
$\alpha$ (cm <sup>-1</sup> )	0,000116
$I$ (ad)	0,360
$\Psi$ (cm)	109450,089
$k$ (cm/min)	0,020
$\Delta\Theta$	0,128
$k$ ajustado (cm/min)	0,0000035

Tabela 35- Taxa de infiltração observada para o ensaio 5

Taxa de Infiltração Observada				
Tempo (min)	Tempo acumulado (min)	Altura Lâmina (cm)	Diferença (cm)	Taxa de infiltração (cm/min)
0	0	17,30	0,00	0,00
0,5	0,5	17,20	0,10	0,20
0,5	1	17,20	0,00	0,00
1	2	17,20	0,00	0,00
1	3	17,10	0,10	0,10
1	4	17,10	0,00	0,00
1	5	17,10	0,00	0,00
5	10	17,10	0,00	0,00
5	15	17,00	0,10	0,02
5	20	17,00	0,00	0,00
5	25	17,00	0,00	0,00
5	30	17,00	0,00	0,00

Tabela 36- Taxa de infiltração teórica para o ensaio 5

Taxa de Infiltração Teórica				
Tempo (min)	F(t) (cm)	Lado Direito F(t)	Diferença	f(t) (cm/min)
0,5	16,75475687	16,75475688	0,0000000	16,76143596
1	23,69870986	23,69870987	0,0000000	11,85603204
2	33,5228651	33,52286509	0,0000000	8,387384122
3	41,06430037	41,06430036	0,0000000	6,850718814
4	47,42411871	47,42411869	0,0000000	5,934684274
5	53,02881899	53,02881898	0,0000000	5,309551879
10	75,03315716	75,03315713	0,0000000	3,758329823
15	91,93321152	91,93321147	0,0000001	3,071113787
20	106,1910974	106,1910973	0,0000001	2,661452025
25	118,760494	118,7604939	0,0000001	2,381885503
30	130,1305061	130,130506	0,0000001	2,175518315

Tabela 37- Taxa de infiltração ajustada para o ensaio 5

Taxa de Infiltração Ajustada				
Tempo (min)	F(t) (cm)	Lado Direito F(t)	Diferença	f(t) (cm/min)
0,5	0,23054546	0,230545315	0,0000001	0,212921467
1	0,31337316	0,313373159	0,0000000	0,156645092
2	0,443146431	0,44314643	0,0000000	0,110773366
3	0,542730479	0,542730478	0,0000000	0,090448523
4	0,62668485	0,626684849	0,0000000	0,078331978
5	0,70065127	0,700651269	0,0000000	0,07006299
10	0,990863315	0,990863314	0,0000000	0,049543401
15	1,213555451	1,213555451	0,0000000	0,040452637
20	1,401295973	1,401295973	0,0000000	0,035033409
25	1,566700535	1,566700535	0,0000000	0,031335123
30	1,716238963	1,716238963	0,0000000	0,028605153

## ENSAIO 6- Dados obtidos

Tabela 38- Teor de umidade para o ensaio 6

Teor de umidade			
	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3
Peso p.alm (g)	0,393	0,410	0,455
Peso úmido (g)	237,814	229,61	229,379
Peso seco (g)	195,177	187,350	188,372
Teor de umidade (%)	21,845	22,558	21,769
Média		22,057	

Tabela 39- Dados para o potencial mátrico para o ensaio 6  
Equação Van Genuchten

Porosidade (%)	0,326
Umidade (ad)	0,221
Umidade Residual (ad)	0,072
$\Theta$ (ad)	0,585
Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> )	1,818
Argila (%)	80,000
Silte (%)	15,700
Areia (%)	4,300
Matéria Orgânica (%)	0,245
$\alpha$ (cm <sup>-1</sup> )	0,000116
$I$ (ad)	0,360
$\Psi$ (cm)	31845,456
$k$ (cm/min)	0,040
$\Delta\Theta$	0,105
$k$ ajustado(cm/min)	0,00002

Tabela 40- Taxa de infiltração observada para o ensaio 6

Taxa de Infiltração Observada				
Tempo (min)	Tempo acumulado (min)	Altura Lâmina (cm)	Diferença (cm)	Taxa de infiltração (cm/min)
0	0	16,00	0,00	0,00
0,5	0,5	15,90	0,10	0,20
0,5	1	15,90	0,00	0,00
1	2	15,90	0,00	0,00
1	3	15,80	0,10	0,10
1	4	15,80	0,00	0,00
1	5	15,80	0,00	0,00
5	10	15,60	0,20	0,04
5	15	15,60	0,00	0,00
5	20	15,60	0,00	0,00
5	25	15,60	0,00	0,00



Tabela 41- Taxa de infiltração teórica para o ensaio 6

Taxa de Infiltração Teórica				
Tempo (min)	F(t) (cm)	Lado Direito F(t)	Diferença	f(t) (cm/min)
0,5	11,60235541	11,60235441	0,0000010	11,61511995
1	16,41581953	16,41581854	0,0000010	8,22105092
2	23,23096678	23,23096579	0,0000010	5,821018791
3	28,46664794	28,46664695	0,0000010	4,757754468
4	32,88473247	32,88473148	0,0000010	4,123921182
5	36,78032693	36,78032593	0,0000010	3,691371989
10	52,0934466	52,09344564	0,0000010	2,618033596
15	63,87476243	63,87476155	0,0000009	2,142530802
20	73,82789922	73,82789843	0,0000008	1,859077299
25	82,61274006	82,61273937	0,0000007	1,665640977

Tabela 42- Taxa de infiltração ajustada para o ensaio 6

Taxa de Infiltração Ajustada				
Tempo (min)	F(t) (cm)	Lado Direito F(t)	Diferença	f(t) (cm/min)
0,5	0,271786482	0,271785482	0,0000010	0,247086474
1	0,376047792	0,376046734	0,0000011	0,178585941
2	0,524729434	0,524728434	0,0000010	0,127989432
3	0,640049254	0,640048254	0,0000010	0,104932751
4	0,73755633	0,73755533	0,0000010	0,091062982
5	0,823601403	0,823600403	0,0000010	0,081551342
10	1,161900675	1,161899674	0,0000010	0,057812658
15	1,421888127	1,421887127	0,0000010	0,047245465
20	1,641208735	1,641207735	0,0000010	0,040934557
25	1,834504693	1,834503693	0,0000010	0,036623519

## ENSAIO 7- Dados observados

Tabela 43- Teor de umidade para o ensaio 7

Teor de umidade			
	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3
Peso p.alm (g)	0,47	0,47	0,35
Peso úmido (g)	217,92	200,08	199,67
Peso seco (g)	196,20	175,30	174,22
Teor de umidade (%)	29,465	30,279	30,314
Média		30,019	

Tabela 44- Dados para o potencial mátrico para o ensaio 7

Equação Van Genuchten	
Porosidade (%)	0,326
Umidade (ad)	0,300
Umidade Residual (ad)	0,072
$\Theta$ (ad)	0,898
Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> )	1,818
Argila (%)	80,000
Silte (%)	15,700
Areia (%)	4,300
Matéria Orgânica (%)	0,245
$\alpha$ (cm <sup>-1</sup> )	0,000116
$l$ (ad)	0,360
$\Psi$ (cm)	112,834
$k$ (cm/min)	0,020
$\Delta\Theta$	0,026
$k$ ajustado(cm/min)	0,015

Tabela 45- Taxa de infiltração observada para o ensaio 7

Taxa de Infiltração Observada				
Tempo (min)	Tempo acum (min)	Altura Lâmina (cm)	Diferença (cm)	Taxa de infiltração (cm/min)
0	0	17,00	0,00	0,00
0,5	0,5	16,90	0,10	0,20
0,5	1	16,90	0,00	0,00
1	2	16,80	0,10	0,10
1	3	16,80	0,00	0,00
1	4	16,78	0,02	0,02
1	5	16,70	0,08	0,08
1	6	16,70	0,00	0,00
2	8	16,70	0,00	0,00
2	10	16,70	0,00	0,00
5	15	16,60	0,10	0,02
5	20	16,60	0,00	0,00
5	25	16,60	0,00	0,00

Tabela 46- Taxa de infiltração teórica para o ensaio 7

Taxa de infiltração Teórica				
Tempo (min)	F(t) (cm)	Lado Direito F(t)	Diferença	f(t) (cm/min)
0,5	0,248064993	0,248063996	0,0000010	0,254797518
1	0,354777108	0,354776117	0,0000010	0,184173627
2	0,509713764	0,509712776	0,0000010	0,134270103
3	0,631824412	0,631823388	0,0000010	0,112185492
4	0,736960952	0,736959935	0,0000010	0,099034099
5	0,83126132	0,831260356	0,0000010	0,090068272
6	0,917872664	0,917871689	0,0000010	0,083456563
8	1,074850079	1,074849046	0,0000010	0,074188994
10	1,216562097	1,216561055	0,0000010	0,067876754
15	1,528998281	1,528997348	0,0000009	0,058093597
20	1,803900541	1,803899625	0,0000009	0,05228839
25	1,803900625	1,803899625	0,0000010	0,052288389

Tabela 47- Taxa de infiltração ajustada para o ensaio 7

Taxa de Infiltração Ajustada				
Tempo (min)	F(t) (cm)	Lado Direito F(t)	Diferença	f(t) (cm/min)
0,5	0,214050852	0,214049855	0,0000010	0,219081333
1	0,30567402	0,30567302	0,0000010	0,157909703
2	0,438255654	0,438254654	0,0000010	0,114676486
3	0,54239534	0,54239434	0,0000010	0,095538641
4	0,631824274	0,631823275	0,0000010	0,084139134
5	0,711859619	0,711858619	0,0000010	0,076365728
6	0,785227346	0,785226388	0,0000010	0,07063202
8	0,91787257	0,917871617	0,0000010	0,062592427
10	1,037272311	1,037271397	0,0000009	0,057114094
15	1,299442616	1,299441675	0,0000009	0,048617324
20	1,528998404	1,528997429	0,0000010	0,043570196
25	1,737784349	1,737783602	0,0000007	0,040137632

## ENSAIO 8- Dados obtidos

Tabela 48- Teor de umidade para o ensaio 8

Teor de umidade			
	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3
Peso p.alm (g)	0,12	0,14	0,22
Peso úmido (g)	166,88	216,91	199,23
Peso seco (g)	157,08	190,08	177,01
Teor de umidade (%)	27,148	27,381	25,491
Média		26,673	

Tabela 49- Dados para o potencial mátrico para o ensaio 8

Equação Van Genuchten	
Porosidade (%)	0,326
Umidade (ad)	0,267
Fator f (ad)	1,112
Umidade Residual (ad)	0,072
$\Theta$ (ad)	0,767
Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> )	1,818
Argila (%)	80,000
Silte (%)	15,700
Areia (%)	4,300
Matéria Orgânica (%)	0,245
$\alpha$ (cm <sup>-1</sup> )	0,000116
l (ad)	0,360
$\Psi$ (cm)	2135,176
k (cm/min)	0,030
$\Delta\Theta$	0,059
k ajustado (cm/min)	0,0012

Tabela 50- Taxa de infiltração observada para o ensaio 8

Taxa de infiltração Observada				
Tempo (min)	Tempo acumulado (min)	Altura Lâmina (cm)	Diferença (cm)	Taxa de infiltração (cm/min)
0	0	20,20	0,00	0,00
0,5	0,5	20,00	0,20	0,40
0,5	1	20,00	0,00	0,00
1	2	19,90	0,10	0,10
1	3	19,80	0,10	0,10
1	4	19,80	0,00	0,00
1	5	19,70	0,10	0,10
1	6	19,70	0,00	0,00
2	8	19,60	0,10	0,05
2	10	19,50	0,10	0,05
5	15	19,40	0,10	0,02
5	20	19,25	0,15	0,03
5	25	19,10	0,15	0,03

Tabela 51- Taxa de infiltração teórica para o ensaio 8

Taxa de Infiltração Teórica				
Tempo (min)	F(t) (cm)	Lado Direito F(t)	Diferença	f(t) (cm/min)
0,5	1,958553764	1,958552762	0,0000010	1,968448589
1	2,775643024	2,775642021	0,0000010	1,39781126
2	3,937084712	3,937083747	0,0000010	0,994306348
3	4,832983651	4,832982698	0,0000010	0,815551133
4	5,591431148	5,591430205	0,0000009	0,708995356
5	6,262042632	6,262041699	0,0000009	0,63628073
6	6,870263783	6,870262858	0,0000009	0,582606989
8	7,954730839	7,954729927	0,0000009	0,507270175
10	8,91499701	8,914996108	0,0000009	0,4558617
15	10,97433423	10,97433335	0,0000009	0,37594862
20	12,72645311	12,72645223	0,0000009	0,328320023
25	12,72645787	12,72645223	0,0000056	0,328319911

Tabela 52- Taxa de infiltração ajustada para o ensaio 8

Taxa de Infiltração Ajustada				
Tempo (min)	F(t) (cm)	Lado Direito F(t)	Diferença	f(t) (cm/min)
0,5	0,390420413	0,390419413	0,0000010	0,390171033
1	0,552142712	0,552141712	0,0000010	0,276241629
2	0,781154177	0,781153176	0,0000010	0,195607501
3	0,957088955	0,957087953	0,0000010	0,159870968
4	1,105541987	1,105540986	0,0000010	0,138564508
5	1,236430653	1,236429652	0,0000010	0,124023088
6	1,354841585	1,354840588	0,0000010	0,113288552
8	1,565268447	1,565267448	0,0000010	0,098219928
10	1,750851894	1,750850891	0,0000010	0,087936195
15	2,146524691	2,146523687	0,0000010	0,071947955
20	2,480726012	2,480725009	0,0000010	0,06241685
25	2,775643021	2,775642018	0,0000010	0,05591245