

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
COORDENAÇÃO DE ENGENHARIA CIVIL
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

RAFAEL DOS SANTOS

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA COMPOSTO DE
FERRAMENTAS ELETRÔNICAS E COMPUTACIONAIS PARA
COLETAS E ANÁLISES DE DADOS DE INFILTRAÇÃO DE ÁGUA.**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**CAMPO MOURÃO
2013**

RAFAEL DOS SANTOS

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA COMPOSTO DE
FERRAMENTAS ELETRÔNICAS E COMPUTACIONAIS PARA
COLETAS E ANÁLISES DE DADOS DE INFILTRAÇÃO DE ÁGUA.**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação,
apresentado à Disciplina de Trabalho de Conclusão
de Curso 2, do Curso de Engenharia Civil - COECI -
da Universidade Tecnológica Federal do Paraná –
UTFPR, como requisito parcial para obtenção do
título de Engenheiro.

Orientador: Prof. Dr. Eudes Jose Arantes

Co-orientador: Prof. Msc. Diogo Heron Macowski

CAMPO MOURÃO

2013



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Câmpus Campo Mourão
Diretoria de Graduação e Educação Profissional
Coordenação de Engenharia Civil



TERMO DE APROVAÇÃO

Trabalho de Conclusão de Curso Nº 16

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA COMPOSTO DE FERRAMENTAS
ELETRÔNICAS E COMPUTACIONAIS PARA COLETAS E ANÁLISES DE DADOS DE
INFILTRAÇÃO DE ÁGUA.**

por

Rafael dos Santos

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado às 19h30min do dia 11 de abril de 2013 como requisito parcial para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL, pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

(aprovado, aprovado com restrições, ou reprovado)

Prof. Msc. Diogo Heron Macowski

(UTFPR)

Co-orientador

Prof. Msc. Paula Cristina de Souza

(UTFPR)

Prof. Dr. Helton Rogerio Mazzer

(UTFPR)

Prof. Dr. Eudes Jose Arantes

(UTFPR)

Orientador

Responsável pelo TCC: **Prof. Msc. Valdomiro Lubachevski Kurta**

Coordenador do Curso de Engenharia Civil:

Prof. Dr. Marcelo Guelbert

A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Eudes Jose Arantes e co-orientador Prof. Msc. Diogo Heron Mascowski pela notória dedicação com que me guiou nesta trajetória.

Ao aluno Hobwan Fuzer por suas cooperações no desenvolvimento do sistema elaborado e descrito no presente trabalho.

A empresa Evolutec por sua cooperação no desenvolvimento do hardware descrito no presente trabalho.

RESUMO

DOS SANTOS, Rafael. Desenvolvimento de um sistema composto de ferramentas eletrônicas e computacionais para coletas e análises de dados de infiltração de água. 2013. 54 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Engenharia Civil. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Campo Mourão, 2013.

No atual cenário dos estudos hidrológicos, as ferramentas eletrônicas e computacionais na área de programação tem se destacado nos últimos anos. O uso destas ferramentas permite a coleta de dados com maiores precisões, realizar análises mais precisas, aplicar métodos de cálculo de difícil realização manual e um melhor aproveitamento do tempo. No presente trabalho é apresentado o desenvolvimento de um sistema para estudos de infiltração de água, baseado em ferramentas eletrônicas e computacionais. Este sistema se trata da utilização dos anéis concêntricos acoplado de um dispositivo para controle de volume de água, um reservatório acoplado com um dispositivo eletrônico de leitura de nível de água e armazenamento de dados, como também um software para análises matemáticas. Foram realizados três ensaios, dois de maneira convencional manual e um utilizando o sistema desenvolvido. Comparado as realizações dos ensaios entre si verificou-se benefícios em relação a praticidade. Como também foi estudada e apresentada a comprovação estatística do sistema desenvolvido e apontado outros de benefícios.

Palavras –chave: Infiltração de água no solo, sistema eletrônico de coleta de dados, software para realização de cálculos.

ABSTRACT

DOS SANTOS, Rafael. Development of a system composed of electronic and computational tools for sample and analyses of data of infiltration of water. 2013. 54 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Engenharia Civil. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Campo Mourão, 2013.

The electronic and computational tools in the development software has been outstanding in the last years, in the current scenery of the hydrologic studies. The use of these tools allows the collection of data with larger precisions, to realize more necessary analyses, to apply methods of I make calculations of difficult manual execution and a better use of the time. In the present work the development of a system is presented for studies of infiltration of water, based on electronic tools and computational. This system is treated of the use of the coupled of a device concentric rings for control of volume of water, a reservoir coupled with an electronic device of reading of level of water and storage of data, as well as a software for you analyze mathematics. Three analyses were realized, two in a manual conventional method and one using the developed system. Compared the results of the rehearsals amongst themselves it was verified benefits in relation to practical. As well as it was studied and presented the statistical proof of the developed system and pointed others of benefits.

Words - key: Infiltration of water in the soil, electronic system of collection of data, software for execution of calculations.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 –	SÉRIE DE PENEIRAS DE ABERTURA DE MALHAS CONHECIDAS.	15
FIGURA 2 –	CURVA GRANULOMÉTRICA - ABNT - NBR NM248.....	16
FIGURA 3 –	CURVA DE VELOCIDADE DE INFILTRAÇÃO E INFILTRAÇÃO ACUMULADA POR TEMPO, COM O SOLO INICIALMENTE ÚMIDO E SECO.....	18
FIGURA 4 –	CURVA DE VELOCIDADE DE INFILTRAÇÃO E INFILTRAÇÃO ACUMULADA POR TEMPO.....	19
FIGURA 5 –	SIMULADOR DE CHUVA.....	20
FIGURA 6 –	SISTEMA MECÂNICO DE VARREDURA DO TOMÓGRAFO.....	21
FIGURA 7 –	TOMÓGRAFO PORTÁTIL REALIZANDO A VARREDURA TOMOGRÁFICA DURANTE O PROCESSO DE INFILTRAÇÃO DE ÁGUA.....	21
FIGURA 8 –	TELA PRINCIPAL DO PROGRAMA DE RECONSTRUÇÃO E VISUALIZAÇÃO DE IMAGEM.....	22
FIGURA 9 –	INFILTRÔMETRO CONSTRUÍDO (A) BRAÇADEIRA DO INFILTRÔMETRO (B), BASE DO INFILTRÔMETRO (C).....	23
FIGURA 10 –	LOCALIZAÇÃO UTFPR CAMPUS CAMPO MOURÃO.....	25
FIGURA 11 –	SISTEMA MONTADO.....	28
FIGURA 12 –	DESCRIÇÃO DO HARDWARE.....	29
FIGURA 13 –	ANÉIS CONCÊNTRICOS.....	32
FIGURA 14 –	INFILTRAÇÃO DE ÁGUA NOS ANÉIS CONCÊNTRICO.....	33
FIGURA 15 –	FOTO DO HARDWARE.....	34
FIGURA 16 –	VISTA INTERNA DO HARDWARE.....	35
FIGURA 17 –	FOTO DO SISTEMA MONTADO.....	35
FIGURA 18 –	INTERFACE DO SOFTWARE.....	36
FIGURA 19 –	INFILTRAÇÃO ACUMULADA PLOTADA EM FORMA DE EQUAÇÃO E PONTOS, OBTIDA ATRAVES DA EQUAÇÃO DE KOSTIAKOV FEITA COM 17 PONTOS DE AMOSTRA DE INFILTRAÇÃO.....	41
FIGURA 20 –	VELOCIDADE INSTANTÂNEA, MÉDIA E TAXA DE INFILTRAÇÃO EM FUNÇÃO DO TEMPO OBTIDA ATRAVÉS DE 17 PONTOS DE INFILTRAÇÃO.....	42
FIGURA 21 –	INFILTRAÇÃO ACUMULADA PLOTADA EM FORMA DE EQUAÇÃO E PONTOS, OBTIDA ATRAVES DA EQUAÇÃO DE KOSTIAKOV FEITA COM 17 PONTOS DE AMOSTRA DE INFILTRAÇÃO.....	43
FIGURA 22 –	VELOCIDADE INSTANTÂNEA, MÉDIA E TAXA DE INFILTRAÇÃO EM FUNÇÃO DO TEMPO OBTIDA ATRAVÉS DE 17 PONTOS DE INFILTRAÇÃO.....	44
FIGURA 23 –	DADOS DE INFILTRAÇÃO COLETADOS PELO APARELHO.....	45
FIGURA 24 –	VELOCIDADE INSTANTÂNEA, MÉDIA E TAXA DE INFILTRAÇÃO EM FUNÇÃO DO TEMPO OBTIDA ATRAVÉS DE 17 PONTOS DE INFILTRAÇÃO.....	46
FIGURA 25 –	INFILTRAÇÃO ACUMULADA PLOTADA EM FORMA DE EQUAÇÃO E PONTOS, OBTIDA ATRAVES DA EQUAÇÃO DE KOSTIAKOV FEITA COM 17 PONTOS DE AMOSTRA DE INFILTRAÇÃO.....	47
FIGURA 26 –	LINEARIZAÇÃO DA EQUAÇÃO DE KOSTIAKOV OBTIDA ATRAVÉS	

	DOS 17 PONTOS DE INFILTRAÇÃO.....	47
FIGURA 27 –	CURVA INFILTRAÇÃO ACUMULADA E VELOCIDADE MEDIA DE INFILTRAÇÃO EM FUNÇÃO DO TEMPO REFERENTE A EQUAÇÃO DE KOSTIAKOV OBTIDA ATRAVÉS DOS 17 PONTOS DE INFILTRAÇÃO.....	48
FIGURA 28 –	CURVA INFILTRAÇÃO ACUMULADA EM FUNÇÃO DO TEMPO, APARTIR DA EQUAÇÃO FORMADA POR 17 PONTOS E 340 PONTOS DE INFILTRAÇÃO.....	49

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 –	CLASSIFICAÇÃO DE VELOCIDADE DE INFILTRAÇÃO.....	18
TABELA 2 –	CLASSIFICAÇÃO HIDROLÓGICA DO SOLO SEGUNDO O SOIL CONSERVATION SERVICE (SCS).....	31
TABELA 3 –	TESTE DE AFERIÇÃO 1.....	37
TABELA 4 –	TESTE DE AFERIÇÃO 2.....	37
TABELA 5 –	TESTE DE AFERIÇÃO 3.....	38
TABELA 6 –	ENSAIOS ESTATÍSTICOS DOS TESTES DE AFERIÇÃO.....	38
TABELA 7 –	ANALISE DE VARIÂNCIA DOS TESTES DE AFERIÇÃO.....	39
TABELA 8 –	ANALISE DE VARIÂNCIA COM CRITÉRIO DUPLÔ E REPETIÇÃO DOS TESTES DE AFERIÇÃO	39
TABELA 9 –	DADOS DE INFILTRAÇÃO DO ENSAIO REALIZADO MANUALMENTE A UMA HUMIDADE DE 11%.....	40
TABELA 10 –	DADOS DE INFILTRAÇÃO DO ENSAIO REALIZADO MANUALMENTE A UMA HUMIDADE DE 8%.....	42
TABELA 11 –	DIFERENÇAS DA EQUAÇÃO DE COSTIAKOV FORMADA COM 17 E 340 PONTOS DE ESTUDO EM RELAÇÃO A SUAS VARIÁVEIS.....	49
TABELA 12 –	DIFERENÇAS DA EQUAÇÃO DE COSTIAKOV FORMADA COM 17 E 340 PONTOS DE INFILTRAÇÃO EM RELAÇÃO A INFILTRAÇÃO DE AGUA.....	50

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
2 OBJETIVOS	11
2.1 OBJETIVO GERAL	11
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	11
3 JUSTIFICATIVA	12
4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
4.1 INFILTRAÇÃO DE AGUA	13
4.2 TEXTURA E ESTRUTURA DO SOLO	14
4.2.1 Granulometria	14
4.2.2 Condutividade Hidráulica	16
4.2.3 Porosidade	17
4.3 VELOCIDADE DE INFILTRAÇÃO	17
4.4 SIMULADORES DE CHUVA	19
4.5 SISTEMAS PARA ANÁLISE DE INFILTRAÇÃO DE AGUA	20
4.5.1 Tomografo Computadorizado	20
4.5.2 Infiltrometro de Pressão	23
5 METODOLOGIA	25
5.1 LOCALIZAÇÃO	25
5.2 DESCRIÇÃO DO RESERVATORIO	25
5.3 DESCRIÇÃO DO HARDWARE	26
5.4 DESCRIÇÃO DO SOFTWARE	26
5.4.1 Análises Realizadas pelo Software	27
5.5 METODOLOGIA DO ENSAIO	27
5.6 METODOS NUMERICOS	29
5.6.1 Metodo de Kostiaikov	29
5.6.2 Metodo de Horton	30
5.6.3 Metodos de Ensaio	32
6 RESULTADOS E DISCUSSÕES	34
6.1 PRECISÃO DO APARELHO	36
6.2 DOS ENSAIOS REALIZADOS DE FORMA TRADICIONAL	40
6.3 DO ENSAIO REALIZADO DE FORMA AUTOMATIZADA	44
7 CONCLUSÕES	51
REFERÊNCIAS	53

1 INTRODUÇÃO

A Infiltração é um processo dinâmico que consiste na passagem de água da superfície para o interior do solo atravessando as mais diversas camadas existentes. Sendo assim, pode-se dizer que a infiltração é um processo que depende fundamentalmente da água disponível, geralmente proveniente de chuvas, derretimento da neve, da composição do solo, do seu estado superficial e da quantidade de ar e água armazenada inicialmente em seus poros.

O conhecimento da infiltração da água no solo é fundamental para estudos relativos às áreas de irrigação, drenagem urbana e rural e resolução de problemas relacionados a assoreamento, conservação da água e do solo e estudos geotécnicos como, por exemplo, em estudos dos solos colapsíveis e compactação de solos. No entanto, o estudo sobre a infiltração de água, de dados provenientes da mesma e suas relações com as propriedades do determinado tipo de solo é importante para o manejo do solo como também da água.

O processo para obtenção dos resultados da infiltração foi realizado através da utilização dos anéis concêntrico que delimitam o contorno da área de infiltração de água no solo acoplado a dois reservatórios, fornecendo o volume de água necessário de forma constante, com a reposição da água nos anéis. O reservatório foi conectado a um sensor de captação de dados, que transmite os mesmos para o computador ou para um sistema de armazenamento de dados para que sejam realizadas as análises necessárias.

Desta forma, o propósito deste trabalho foi desenvolver um sistema composto de ferramentas computacionais eletrônicas com aplicações matemáticas para obter resultados mais precisos das análises de infiltrações de água e resultados derivados.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho foi desenvolver um sistema para auxiliar a aquisição de dados e a interpretação de resultados para as análises de infiltrações de água, utilizando ferramentas computacionais, eletrônicas e aplicações matemáticas.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos deste trabalho:

- Coletar dados de capacidade de infiltração de água em função do tempo utilizando medidores eletrônicos tipo transdutor de pressão.
- Utilizar de métodos computacionais para fazer análises matemáticas mais precisas utilizando o método de Horton e de Kostiakov.
- Aferição com análise estatística dos medidores comparando os resultados coletados do aparelho eletrônico com os obtidos de forma convencional.
- Apontar os benefícios de utilizar sistemas não manuais na área hidrológica.

3 JUSTIFICATIVA

Os estudos na área hidrológica ainda são realizados com tecnologias antigas, utilizando técnicas manuais e artesanais. Logo, têm surgido novas tecnologias para a aplicação nas diversas áreas da engenharia que pode gerar economia de tempo e custo, maior precisão na coleta de dados, bem como nos resultados matemáticos e entre outros benefícios. Também sendo mais maleável e prático em relação aos métodos manuais de aquisição dos dados.

Na área de recursos hídricos, estas novas tecnologias vêm sendo aplicadas recentemente e ganhado destaque principalmente as programacionais e eletrônicas, mas ainda tem-se um vasto campo de aplicação.

Para o estudo da infiltração de água no solo, o uso de ferramentas computacionais em conjunto com instrumentos eletrônicos de medição permite a aquisição de dados mais precisos e confiáveis, como também, de resultados a partir de cálculos mais amplos e precisos. Logo pela utilização de ferramentas tecnológicas modernas se consegue mais praticidade na execução do ensaio, como também economia de custo e tempo.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 INFILTRAÇÃO DE ÁGUA

Segundo Fiorin (2008) a infiltração é o termo utilizado para denominar o processo de entrada de água no solo, geralmente por fluxo vertical descendente, por toda ou parte da superfície do solo. Para Reichardt¹ (1990 apud LIMA, 2009), a infiltração inicialmente é bastante rápida, mas, posteriormente há uma diminuição gradativa ocorrendo assim uma desaceleração do processo até atingir certo equilíbrio dinâmico. Todos os fatores que influenciam na infiltração de água no solo também influenciam no escoamento superficial conforme PRUSKI et al² (2003 apud FIORIN, 2010).

Ainda sobre a infiltração, é importante destacar que conforme Musgrave (1955 apud FIORIN, 2010), a infiltração da água no solo depende das condições da superfície e uma função da quantidade de proteção contra o impacto das gotas da chuva, características estas da massa do solo, como também do tamanho dos poros, profundidade da camada permeável até o horizonte adensado, expansibilidade da argila e colóides, conteúdo da matéria orgânica, grau de agregação, conteúdo de umidade do solo, grau de saturação, duração da chuva ou a aplicação da água e temperatura do solo e da água.

Segundo Silveira (2010) os principais fatores que influenciam no processo de infiltração são, o tipo de solo, declividade do terreno, altura de retenção superficial e espessura da camada saturada, grau de umidade do solo, ação da precipitação sobre o solo, compactação devido a homens e animais, macroestrutura do terreno, cobertura vegetal, temperatura, presença do ar e variação da capacidade de infiltração.

Conforme Castro (2001) a capacidade de infiltração é influenciada pela ação do manejo, e os métodos convencionais de análise de taxa de infiltração

¹REICHARDT, K. **A Água em sistemas agrícolas**. São Paulo: Manole LTDA, 1990.

²PRUSKI, F.F.; BRANDÃO, V.S.; SILVA, D.D. **Escoamento superficial**. Viçosa:UFV, 2003. 88p.

normalmente fazem necessária algumas perturbações da superfície do solo, alterando as condições superficiais e reduzindo a validade das observações.

Para Naime (2001) grandes quantias de insumos agrícolas são aplicadas no solo, e uma relevante parte destes degrada os recursos hídricos. Para se fazer uma investigação adequada dos efeitos destes insumos analisa-se as propriedades hidráulicas do solo que tem relevante influenciam no transporte de solutos neste meio.

Para Souza (2002) com o crescimento da urbanização vem juntamente a impermeabilização, e uma parcela de água que entrava no solo, agora passa a fazer parte do escoamento superficial, com o aumento dos volumes escoados e das vazões de picos ao mesmo tempo em que ocorre a diminuição do tempo de concentração, o que faz com que os hidrogramas de cheias se tornem mais críticos. Estas mudanças geram um aumento na frequência e na amplitude das inundações.

Segundo Carvalho (2009) quando a intensidade da chuva supera a capacidade de infiltração do solo ocorrem as enxurradas, o terraciamento é uma prática usada para a preservação do solo pela ação das mesmas.

4.2 TEXTURA E ESTRUTURA DO SOLO

A textura do solo é uma característica que muda pouco em função do tempo e é pouco afetada pela ação manejo do solo Reinert et al³ (2001, apud FIORIN 2010). As principais características da textura e estrutura do solo são granulometria, condutividade hidráulica e porosidade, que serão esplanada logo abaixo.

4.2.1 Granulometria

Soares et al.(2006) define-nos granulometria como a determinação dos diferentes tamanhos em proporções das mais variadas das partículas existentes nos

³REINERT,D.J., REICHERT, J.M.; SILVA, V.R. **Propriedades físicas de solos em sistema de plantio direto irrigado**.In: CARLESSO, R.; PETRY, M.T.; ROSA, G.M. & CERETTA, C.A. eds. Irrigação por aspersão no Rio Grande do Sul. Santa Maria, RS, 2001, 165p.

solos, em sua fase sólida. A determinação do tamanho das partículas e suas respectivas porcentagens de ocorrência permitem obter a função distribuição de partículas do solo e que é denominada distribuição granulométrica.

Segundo Lousada⁴ (2005, apud lima, 2009) a capacidade que o solo possui que permite o escoamento da água entre os seus espaços vazios que é também controlada pela porosidade, estrutura e a granulometria dos solos é denominada como condutividade hidráulica.

Ainda para Naime (2001) na condutividade hidráulica influem a granulometria do solo, a massa específica e a viscosidade do fluido, as quais por sua vez são funções da temperatura e da pressão.

A distribuição granulométrica dos materiais areias e pedregulhos são obtidos pelo processo de peneiramento de uma amostra de solo, enquanto que, para siltes e argilas se utiliza o processo de sedimentação. O ensaio de análise granulométrica do solo está normalizado pela ABNT/NBR 7181/82.

Na Figura 1 podem-se observar os equipamentos utilizados para fazer os ensaios granulométricos, destacando as peneiras de abertura de malhas e o agitador de peneiras.

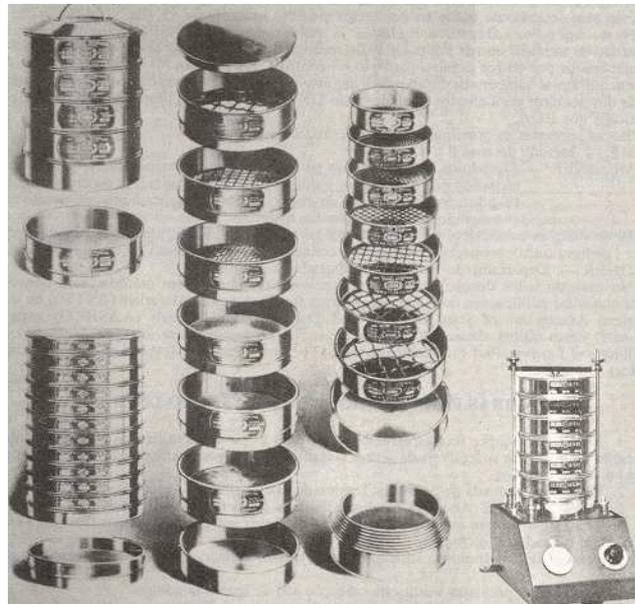


Figura 1 - Série de peneiras de abertura de malhas conhecidas
Fonte: SOARES et al. (2006).

⁴LOUSADA, E. O. **Estudos hidroquímicos e isotópicos no Distrito Federal: modelos conceituais de fluxo**. Tese(Doutorado em Geologia). Instituto de Geociências. Universidade de Brasília. Brasília, 2005.

Já na Figura 2 pode-se observar um exemplo de gráfico da distribuição granulométrica para classificação.

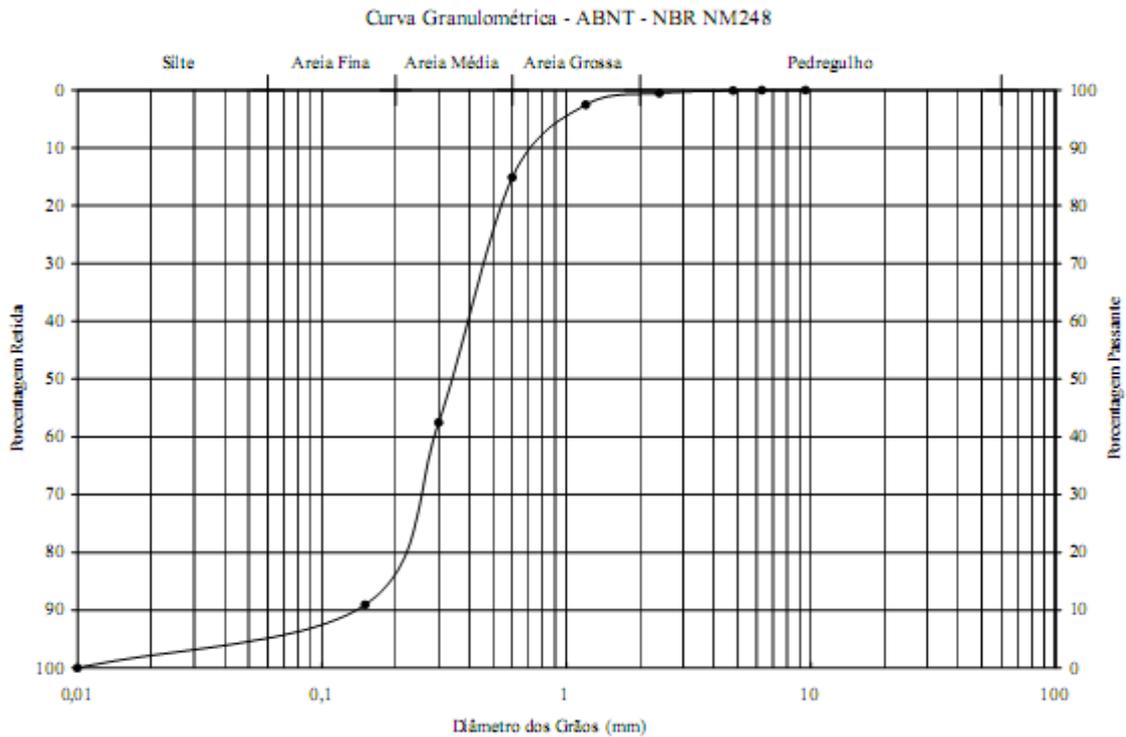


Figura 2 - Curva Granulométrica - ABNT - NBR NM248
 Fonte: SOARES et al. (2006).

4.2.2 Condutividade Hidráulica

A condutividade hidráulica do solo é um indicador numérico que nos referênci a facilidade com que o solo transmite água. O seu valor máximo se encontra quando o solo esta saturado, sendo denominada de condutividade hidráulica saturada conforme Reichardt⁵ (1990, apud FIORIN, 2010).

Segundo Pereira et al.,(2001), condutividade hidráulica é uma das propriedades físicas do solo, como também sendo uma das mais importantes na determinação quantitativa e qualitativa do solo. Para Nobre (2004), pode-se obter a condutividade hidráulica tanto diretamente ou na forma experimental através de ensaios, direto ou indireto através de modelos empíricos.

⁵REICHARDT, K. **A Água em sistemas agrícolas**. São Paulo: Manole LTDA, 1990.

4.2.3 Porosidade

Para Pinto et al.⁶(1976, apud LIMA, 2009) a capacidade de infiltração varia em função da porosidade e em função do tamanho das partículas do solo.

Fiorin (2010) explica sobre a porosidade que entre as partículas do solo ou mesmo entre agregados existem espaços porosos oriundos do arranjo, distribuição e orientação das partículas do solo, que podem armazenar água e ar, necessários para o crescimento e desenvolvimento do sistema radicular das plantas, dos microrganismos e animais do solo. O volume total de poros é denominado de porosidade total do solo. A porosidade total do solo pode ser dividida em micro porosidade e macro porosidade.

E ainda para Soares et al.(2006) a permeabilidade dos solos esta relacionada com o índice de vazios, conseqüentemente, com a porosidade. Quanto maior for à porosidade de um solo (maior a dimensão dos poros), maior será o índice de vazios, por conseqüência, mais permeável (para argilas moles, isto não se verifica).

4.3 VELOCIDADE DE INFILTRAÇÃO

Capacidade de infiltração pode ser definida como a quantidade máxima de água que pode infiltrar no solo, num determinado espaço de tempo, sendo comumente expresso em mm.h^{-1} . A capacidade de infiltração só é atingida durante uma chuva se ocorrer o excesso de precipitação.

Conforme Lima (2009) a velocidade de infiltração é a velocidade média com que a água é escoada no solo saturado, ainda com outras palavras seria, a quantidade de água que atravessa a área do solo sendo este fenômeno podendo ser expresso em metros por segundo, metros por dia ou metros cúbicos por metro quadrado e por dia.

⁶PINTO, N.S.; HOLTZ, A.C.T.; MARTINS, J.A.; GOMIDE, F.L.S. **Hidrologia Básica**. São Paulo: Edgard Blücher LTDA. 1976.

Quanto mais úmido for o solo no princípio da chuva, menor será a taxa infiltração inicial, e mais rápido se alcançará a taxa constante de infiltração e de escoamento superficial, logo, este valor depende da umidade inicial conforme HILLEL⁷ (1970 apud LIMA, 2009).

O solo pode ser classificado de acordo com a velocidade de infiltração básica conforme abaixo (Tabela 1):

Tabela 1 - Classificação de velocidade de infiltração.

Classificação de velocidades	Parâmetros
Solo de VIB baixa	$VIB < 5 \text{ mm.h}^{-1}$
Solo de VIB média	$5 < VIB < 15 \text{ mm.h}^{-1}$
Solo de VIB alta	$15 < VIB < 30 \text{ mm.h}^{-1}$
Solo de VIB muito alta	$VIB > 30 \text{ mm.h}^{-1}$

Fonte: Carvalho e Silva (2006).

A Figura 3 demonstra a curva de velocidade de infiltração e a infiltração acumulada por tempo, com o solo inicialmente úmido e seco.

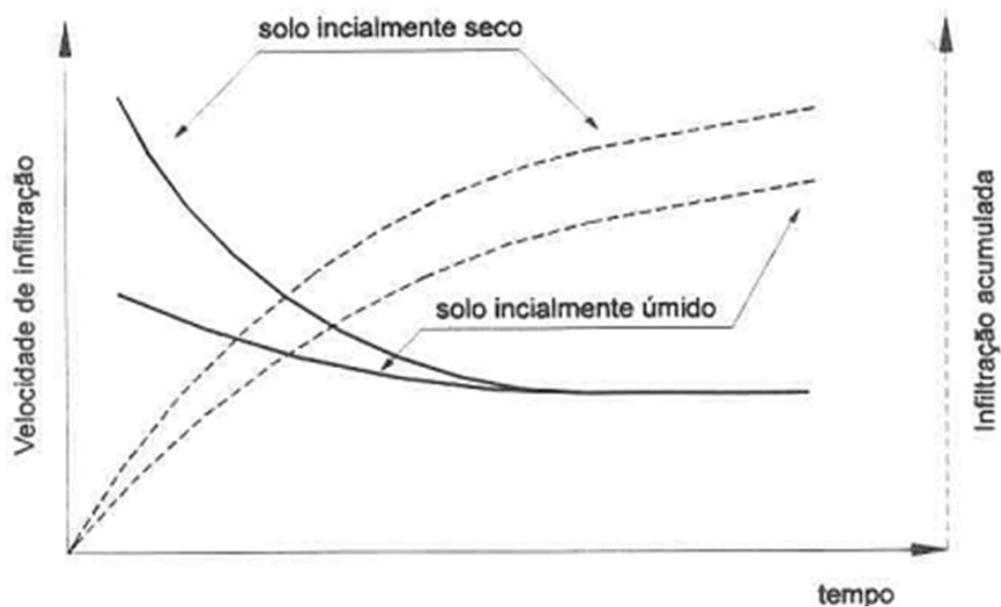


Figura 3- Curva de velocidade de infiltração e infiltração acumulada por tempo, com o solo inicialmente úmido e seco

Fonte: Carvalho e Silva (2006).

⁷HILLEL, D. **Solo e água, fenômenos e princípios físicos**. Tradução Wisconsin. Departamento de Solos, UFRGS. Porto Alegre. 1970.

A Figura 4 demonstra a curva de velocidade de infiltração e a infiltração acumulada por tempo.

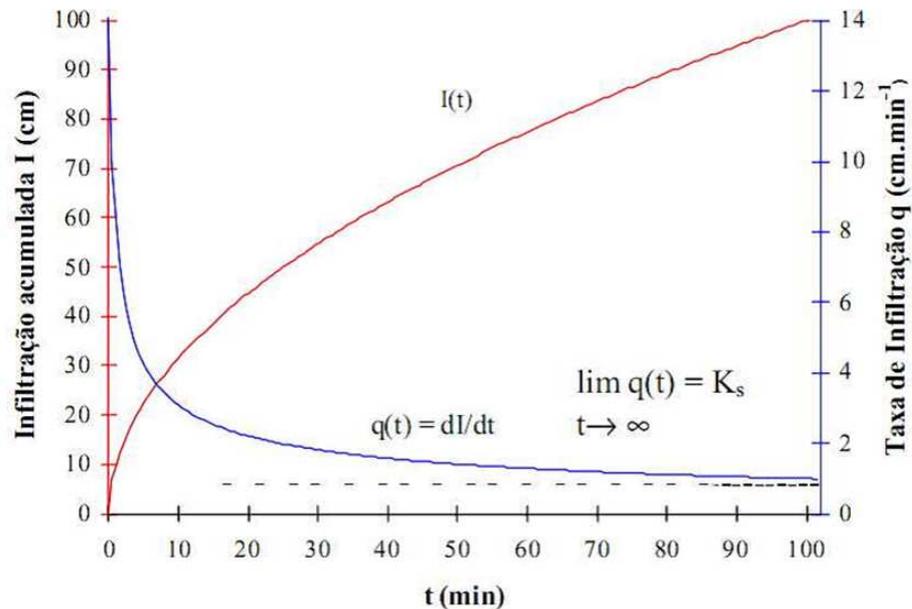


Figura 4 - Curva de velocidade de infiltração e infiltração acumulada por tempo

Fonte: Kutílek e Nielsen⁸ (1994, apud Naime 2001).

4.4 SIMULADORES DE CHUVA

O simulador de chuva, como o próprio nome já diz, é um equipamento que simula chuva em uma determinada região predeterminada, sendo usado muitas vezes juntamente com os anéis concêntricos.

Para Carvalho e Silva (2006) simuladores de chuva são equipamentos nos quais a água é aplicada por aspersão, com intensidade de precipitação superior à capacidade de infiltração do solo. O objetivo deste teste, portanto, é coletar a lâmina de escoamento superficial originada pela aplicação de uma chuva com intensidade superior à CI do solo.

Complementando ainda que taxa de infiltração é obtida pela diferença entre a intensidade de precipitação e a taxa de escoamento resultante.

⁸KUTÍLEK, M.; NIELSEN, D.R. (1994) **Soilhydrology**. Cremlingen- Dested, Catena Verlag, 370p.

Na Figura 5 pode-se observar o simulador de chuva.

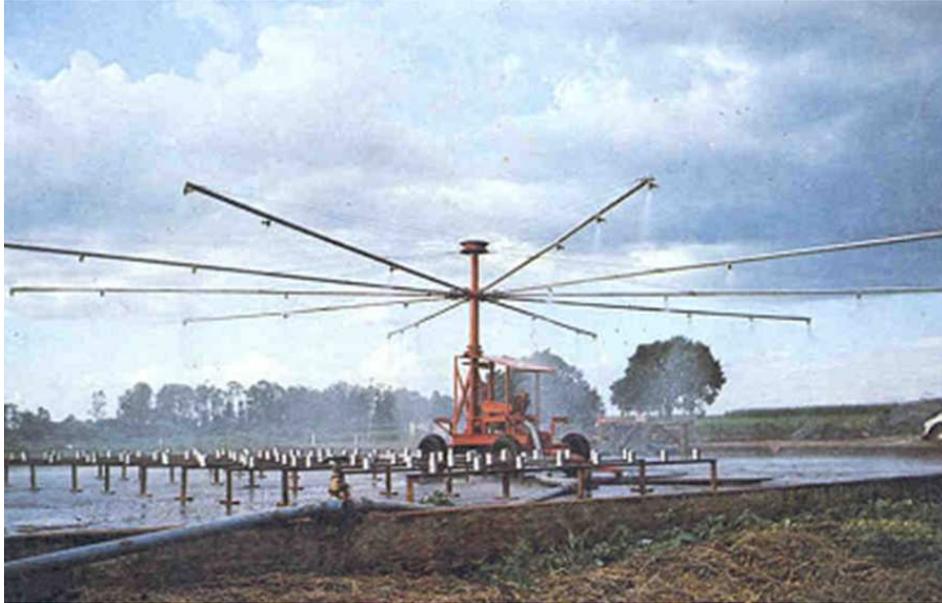


Figura 5 - Simulador de chuva
Fonte: Carvalho e Silva (2006).

4.5 SISTEMAS PARA ANÁLISE DE INFILTRAÇÃO DE ÁGUA

Alguns projetos vêm sendo desenvolvidos para a aquisição e análises de infiltração de água no solo o presente trabalho cita dois projetos já realizados sendo o primeiro a construção de um tomógrafo computadorizado e o segundo um infiltrômetro de pressão sendo os mesmos melhor descritos nos tópicos abaixo:

4.5.1 Tomógrafo Computadorizado

Alguns estudos de aplicações de ferramentas tomográficas têm surgido recentemente. Para Naime (2001) o desenvolvimento de um tomógrafo computadorizado que permitem analisar a infiltração da água na região não saturada do solo trazendo uma contribuição às áreas da ciência do solo e do ambiente.

Foi desenvolvido um novo método, de laboratório e de campo, construindo e utilizando um tomógrafo portátil com sistema de varredura com rapidez suficiente para monitorar e medir não destrutivamente, em duas e três dimensões, o

movimento da água na região não saturada do solo e estimar as propriedades hidráulicas do solo.

Na Figura 6 pode-se observar o sistema mecânico de varredura do tomógrafo.

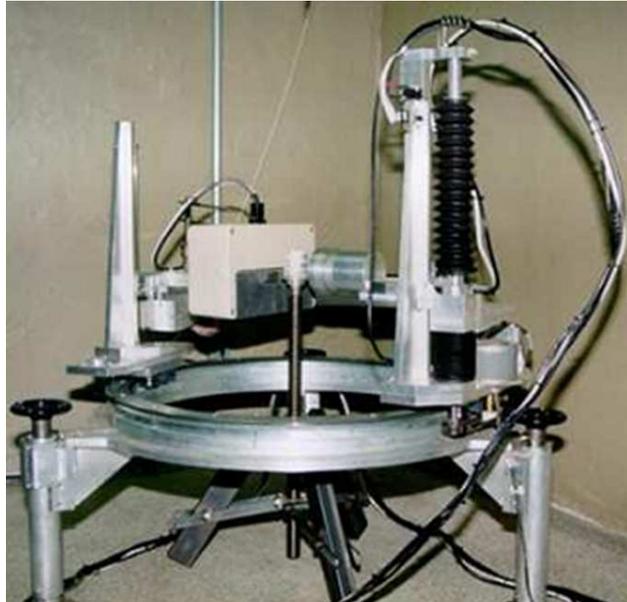


Figura 6 - Sistema mecânico de varredura do tomógrafo
Fonte: Naime (2001, p.63).

Na Figura 7 pode-se observar a demonstração do tomógrafo portátil realizando a varredura tomográfica durante o processo de infiltração de água.



Figura 7 – Tomógrafo portátil realizando a varredura tomográfica durante o processo de infiltração de água
Fonte: Naime (2001, p.73).

Na Figura 8 verifica-se a tela principal do programa de reconstrução e visualização de imagem.

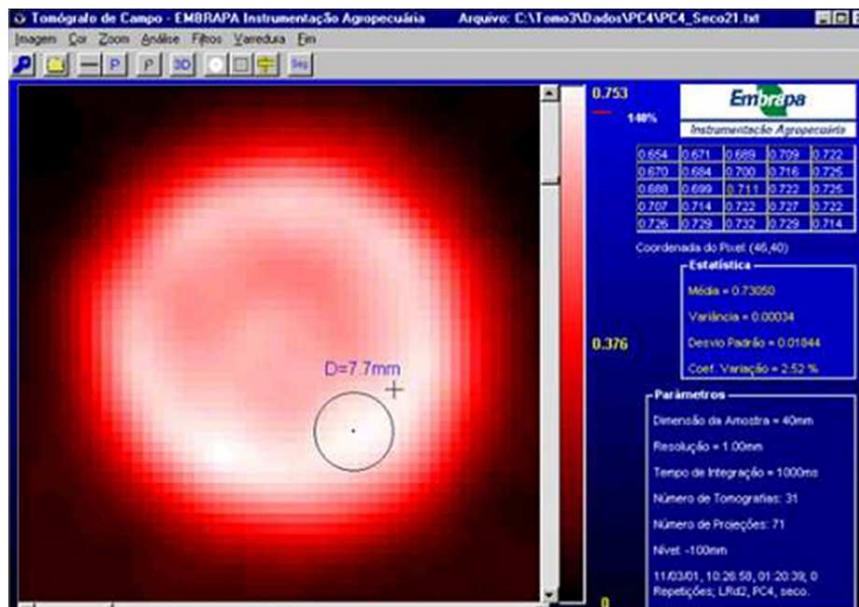


Figura 8- Tela principal do programa de reconstrução e visualização de imagem
 Fonte: Naime (2001, p.66).

No trabalho observou-se a viabilidade na análise quantitativa das medidas tomográficas, tanto em campo como em laboratório, de forma dinâmica. Mostrou-se que além da visualização qualitativa das imagens, ainda pode-se determinar a curva de retenção da água no solo e parâmetros como a sortividade, a condutividade hidráulica e a difusividade hidráulica.

O tomógrafo mostrou-se viável para a medida de umidade e infiltração em solos de textura argilosa ou de baixa condutividade hidráulica, isto porque o tempo de varredura é limitado em 4 minutos. No caso de solos arenosos ou de maior condutividade hidráulica, não é possível fazer estudo com este equipamento.

4.5.2 Infiltrômetro de Pressão

Algumas aplicações de infiltrômetros para estudo da infiltração de água no solo têm surgido recentemente. Lima (2009) desenvolveu um infiltrômetro que permite a obtenção de dados da capacidade de infiltração de forma a aprimorar método de anéis concêntricos.

Na figura 9, Têm-se as seguintes imagens do Infiltrômetro construído por Lima (2009) (a), da braçadeira que fixa o tubo ao anel do infiltrômetro (b) e a base do infiltrômetro (c).

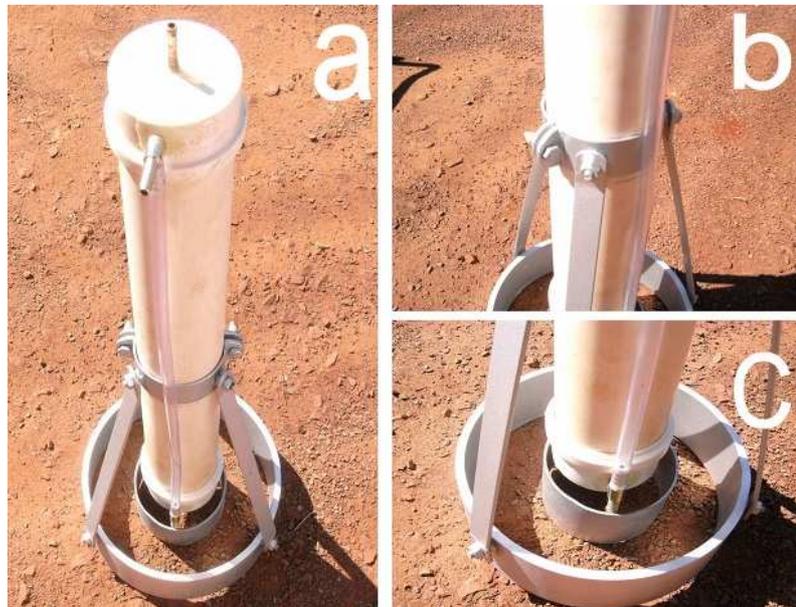


Figura 9 - Infiltrômetro construído (a) braçadeira do infiltrômetro (b), base do infiltrômetro (c)

Fonte: LIMA (2009, p.25).

No estudo de Lima (2009) seis ensaios foram realizados, sendo que dois apresentaram sucesso na sua aplicação. Nos dois ensaios realizados com sucesso foram analisados o comportamento do equipamento através da curva de infiltração construído a partir dos dados experimentais, coletados em campo. Com os resultados experimentais foram apresentadas curvas de interpolação potencial e

também curvas pela utilização do método de Horton, nos quais foram comparados com os dados da literatura.

Pelos resultados obtidos, concluíram que o desenvolvimento do infiltrômetro de pressão com adaptação do frasco de Mariotte teve resultados aceitáveis, pois não apresentou anomalias nos resultados do nível da água do reservatório.

Ainda, pode-se afirmar, com base na condutividade hidráulica, que o equipamento desenvolvido permite estimar a capacidade de infiltração do solo, mas deve tomar cuidados referentes aos procedimentos de ensaios, principalmente na manutenção do nível da água do anel externo e na fixação dos anéis concêntricos de foram a obter resultados satisfatórios.

5 METODOLOGIA

5.1 LOCALIZAÇÃO

Para o sistema automatizado desenvolvido serão realizados os ensaios nas dependências da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, localizada no município de Campo Mourão, Estado do Paraná.

O clima se classifica como do tipo Cfa (Clima subtropical úmido mesotérmico, com verões quentes e geadas pouco freqüentes, com tendência de concentração das chuvas nos meses de verão, sem estação seca definida). A temperatura média anual esta entre 20 e 21° C e os índices pluviométricos apresentam-se em média entre 1.400 mm e 1.500 mm por ano. O solo predominante é o latossolo roxo, de textura argilosa (CAMPO MOURÃO, 2012).

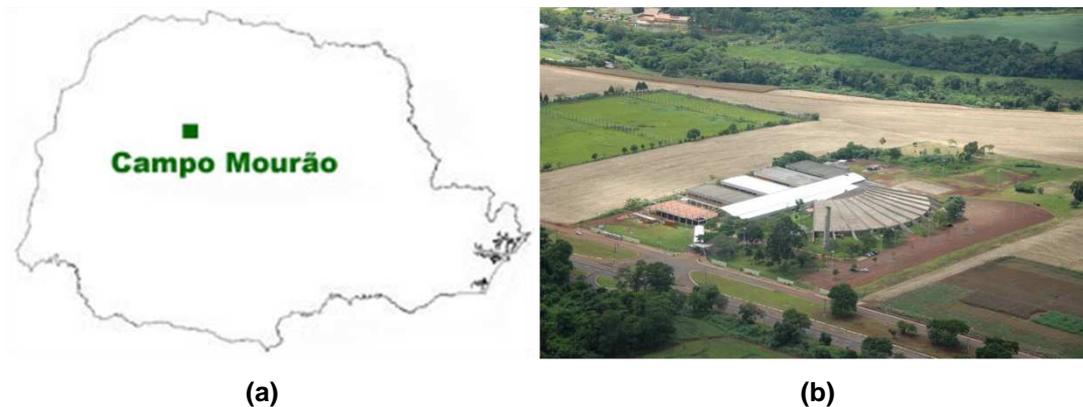


Figura 10: Localização UTFPR Campus Campo Mourão

Fonte (a): <<http://www.paranaturismo.com.br>> Acesso em 12 de abril de 2013

Fonte (b): Google Earth 12/04/2012

5.2 DESCRIÇÃO DO RESERVATÓRIO

Para o desenvolvimento do reservatório foi empregado um tubo de PVC de 200 mm de diâmetro por 1,50 m de altura, com a extremidade inferior tampado com uma tampa de PVC comum (CAP), com um pequeno bico para saída de fluido, como também para ligar o próprio reservatório no hardware de coleta de dados. Na face

externa do reservatório foi instalada uma mangueira transparente e fixada uma trena com graduação milimétrica para a leitura manual do nível da água (Figura 13).

5.3 DESCRIÇÃO DO HARDWARE

O hardware foi desenvolvido juntamente com uma empresa privada chamada Evolutec localizada no município de Campo Mourão, Estado do Paraná. Mas, no entanto, se trata de um aparelho de pequeno porte que conter um leitor de pressão que armazena os dados em um sistema de armazenamento de arquivo (Figura 14).

5.4 DESCRIÇÃO DO SOFTWARE

Um programa computacional para análise dos resultados da infiltração de água do solo foi desenvolvido neste trabalho. A linguagem computacional utilizada foi Pascal mais interface gráfica .

Este programa dispõe de um espaço para fazer anotações e abrir arquivos tipo txt, cronômetro, calculadora para o usuário poder fazer pequenos cálculos que o programa não abrange. Possui ainda uma planilha visível apresentando todos os cálculos realizados detalhadamente, ferramenta para zoom de forma a facilitar a visualização dos gráficos em tela inteira.

O *software* possui um banco de dados para armazenar os resultados dos ensaios emitidos pelo hardware ou digitado pelo próprio usuário, espaço para armazenar informações relacionadas ao local da onde foram retiradas as amostras, simulador de reservatório, uma plataforma para poder digitar valores no programa através da tela para o usuário poder utilizar o programa em hardware que funciona por *touchscreen*, um espaço contendo instruções e informações e as equações utilizadas no mesmo.

5.4.1 Análises Realizadas pelo Software

O software realiza os cálculos e apresenta equação infiltração por tempo, velocidade média, velocidade instantânea pelo método de Kostiakov. Como também, gera os seguintes gráficos:

- Infiltração proveniente dos dados da amostra por tempo e pela equação gerada através da amostra por tempo, estes dois anteriormente citados em escala comum e logarítmica,
- Velocidade de infiltração média e instantânea por tempo, observando que todos estes gráficos são gerados a partir da equação de infiltração por tempo encontrada pelo método de Kostiakov.

Esta ferramenta computacional, ainda, calcula e gera o gráfico da taxa de infiltração através do método de Horton utilizando os parâmetros e classificação do SCS (soil conservation service) conforme Porto (1995 apud TOMAZ, 2010).

5.5 METODOLOGIA DO ENSAIO

Na realização do ensaio buscou-se verificar o funcionamento do sistema desenvolvido e o seu comportamento, para isso, foi realizado o experimento em um determinado tipo de solo localizado nas dependências do campus de Campo Mourão da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Anterior aos estudos da infiltração da água, utilizando os equipamentos, foram realizadas três ensaios de aferição do aparelho de forma a estudar a precisão do mesmo e a escala de pressão.

Foram realizados três ensaios experimentais, sendo dois de forma tradicional com medição manual e visual da variação do nível da água e o último automatizado utilizando o equipamento desenvolvido neste trabalho. Os testes foram realizados próximos ao bloco F dentro das dependências da UTFPR campus de Campo Mourão com duração de 340 minutos.

Os três pares de anéis foram cravados nos pontos pré-determinados, sendo os dois reservatórios canalizados nos devidos anéis, onde no reservatório que está canalizado no anel central é ligado ao hardware de leitura de pressão. O aparelho

grava 340 índices de infiltração em 340 minutos e emite dois arquivos txt, o primeiro com 17 índices de infiltração em 17 tempos específicos, e no outro arquivo constam os 340 índices. Através do dispositivo de armazenamento de arquivo os dados são gravados no computador e lidos por uma ferramenta do programa, permitindo realizar as análises matemáticas desejadas. Lembrando ainda, que o programa permite ao usuário digitar os dados na ausência do hardware e ou reservatório.

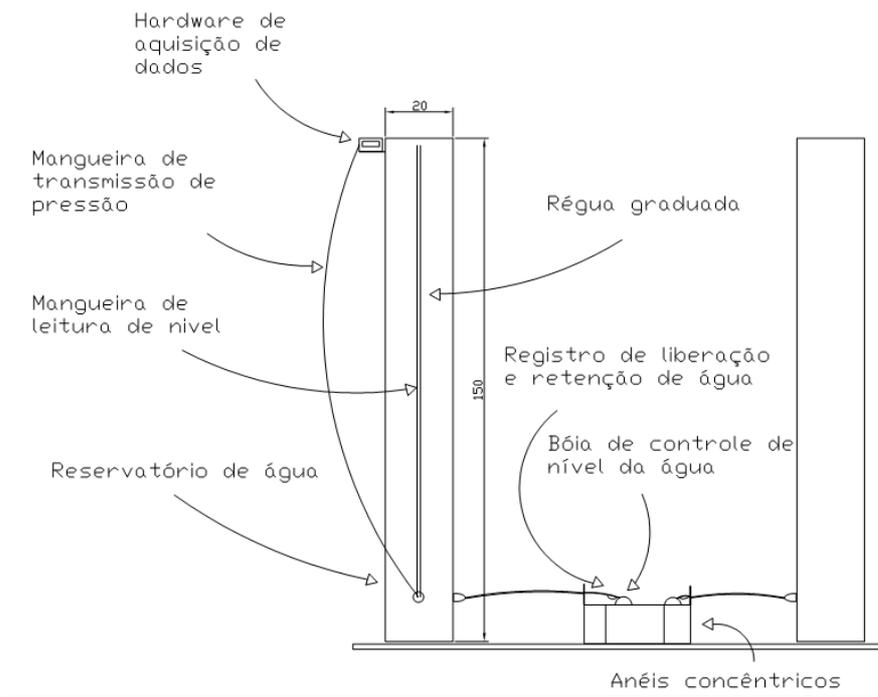


Figura 11 – Sistema montado.

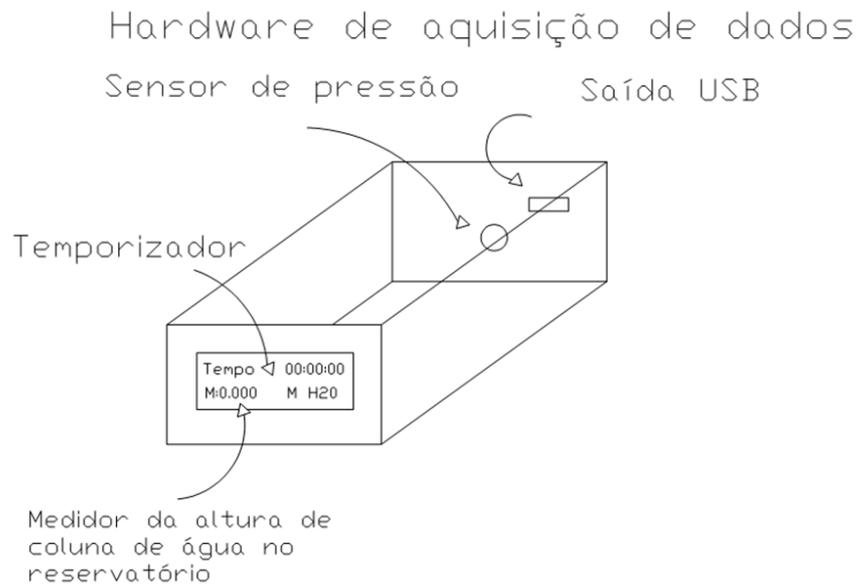


Figura 12 – Discriminação do hardware.

5.6 MÉTODOS NUMÉRICOS

5.6.1 Metodo de Kostiakov

Segundo Carvalho e Silva (2006) a infiltração é descrito pela equação 1

$$I = k.t^m \quad (1)$$

Onde:

I = infiltração acumulada [cm, mm];

k = constante dependente do solo [adimensional];

t = tempo de infiltração [horas, min];

m = constante dependente do solo [adimensional], variando de 0 a 1 em valor absoluto;

Método analítico

Como o método da regressão linear só pode ser aplicado para equações lineares, inicialmente a equação de infiltração, que é uma equação exponencial, deverá ser transformada em uma equação linear. Para isso, basta aplicar as operações logarítmicas correspondentes à equação 2.

$$\log I = \log k + m \cdot \log t \quad (2)$$

Dessa forma, verifica-se que essa apresentação da equação de infiltração nada mais é que uma equação da reta do tipo $Y = A + B X$, em que:

$$Y = \log I;$$

$$A = \log k;$$

$$B = m;$$

$$X = \log t;$$

No método da regressão linear, os valores de A e B são determinados pelas equações 3 e 4:

$$A = \frac{\sum X \times \sum XY - \sum X^2 \times \sum Y}{(\sum X)^2 - N \times \sum X^2} \quad (3)$$

$$B = \frac{\sum X \times Y - \frac{\sum X \times \sum Y}{N}}{\sum X^2 - \frac{(\sum X)^2}{N}} \quad (4)$$

em que N é o número de pares de dados I e t.

5.6.2 Método de Horton

Tomaz (2010) apresenta a equação 5 proposta por Horton para a determinação da capacidade de infiltração em função do tempo de ensaio.

$$f_p = f_f + (f_o - f_f)e^{(-kt)} \quad (5)$$

Onde:

f_p = taxa de infiltração no tempo t (cm.h⁻¹);

f_f = taxa de infiltração mínima (cm.h^{-1});

f_0 = taxa de infiltração inicial (cm.h^{-1});

k = constante da exponencial (h^{-1}) Nota: deve ser obtido experimentalmente;

t = tempo médio do intervalo (h). Nota: a unidade do tempo deve ser compatível com a unidade de k ;

Para os diferentes tipos de solo Porto (1995) apresenta os seguintes parâmetros da fórmula de Horton.

Tabela 2 - Classificação hidrológica do solo segundo o SoilConservation Service (SCS).

	Tipo A (mm/h)	Tipo B (mm/h)	Tipo C (mm/h)	Tipo D (mm/h)
f_0	250	200	130	80
f_f	25	13	7	3
k	2	2	2	2

Fonte: Porto (1995, apud Tomaz 2010).

As classificações hidrológicas do solo abaixo foram estruturadas pelo Soil Conservation Service (SCS) conforme Porto (1995, pag 116, apud SILVEIRA 2010):

Tipo A - Solos arenosos com baixo teor e argila total, inferior a uns 8%, não há rocha nem camadas argilosas e nem mesmo densas até a profundidade de 1,5 m. O teor de húmus é muito baixo, não atingindo 1%.

Tipo B - Solos arenosos menos profundos que os do grupo A e com menor teor de argila total, porém ainda inferior caso de teor a 15%. No caso de terras rochas este limite pode subir a 20 % graças à maior porosidade. Os dois teores de húmus podem subir respectivamente a 1,2 e 1,5. Não pode haver pedras e nem camadas argilosas até 1,5 m, mas é quase sempre camadas mais densas que a camada superficial.

Tipo C - Solos barrentos com teor total de 20% a 30% mas sem camadas argilosas impermeáveis ou contendo pedras ate profundidades de 1,2 m. No caso de terras roxas estes dois limites máximos podem ser de 40% e 1,5 m. Nota-se acerca de 60 cm de profundidade camada mais densas que no grupo B, mas ainda longe das condições de impermeabilidade.

Tipo D - Solos arenosos menos profundos que os do grupo A e com menor teor de argila, porém ainda inferior a 15%. No caso de terras roxas este limite pode subir a 20% graças a maior porosidade. Os dois teores de húmus podem subir

respectivamente a 1,2% e 1,5%. Não pode haver pedras e nem camadas argilosas até 1,5m, mas quase sempre presente camada mais densas que a camada superficial.

5.6.3 Métodos de Ensaio

Os anéis concêntricos constituem um equipamento utilizado para fazer medição de infiltração de água no solo em função do tempo. A princípio o par é preenchido com água e em um determinado tempo é observado a quantidade de água que se infiltra no mesmo, através da leitura da diferença de nível da água observado em uma régua graduada que fica presa em dentro do anel menor.



Figura 13 – Anéis concêntricos
Fonte: Aquari⁹ (2007 apud Lima, 2009).

⁹AQUAGRI. **AQUAGRI ACE: Serviços e Equipamento de Gestão de Água**. 2007. Disponível em: <http://www.aquagri.com/equipamentos/ejk_insitu.htm>. Acesso em 19 de Julho de 2009.

Os cilindros possuem 25 e 50 cm de diâmetro, com 30 cm de altura ambos. Devem ser cravados 15 cm no solo concentricamente entre si. As bordas inferiores devem ser em bisel, com o propósito de facilitar a penetração no solo. Pode-se observar um esquema do ensaio na figura 9 de Carvalho e Silva (2006).

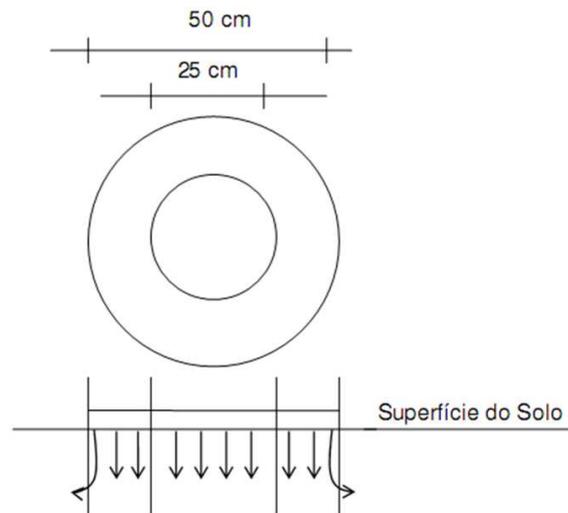


Figura 14 – Infiltração de água nos anéis concêntrico
Fonte : Carvalho e Silva (2006).

Sobre o conceito de velocidade de infiltração básica aplica-se que a condição final do ensaio ocorre quando a TI (taxa de infiltração) permanecer constante. Na prática, considera-se que esta condição ocorra quando TI variar menos que 10% no período de 1 (uma) hora. Neste momento, considera-se que o solo atingiu a chamada taxa de infiltração estável conforme Carvalho e Silva (2006).

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo de resultado e discussões, serão apresentados as ferramentas desenvolvidas para este trabalho, que contemplam o hardware para coleta de dados de pressão e o software para análise matemática dos dados. Ainda apresentam-se neste item do trabalho as análises estatísticas de aferição do aparelho e dos ensaios realizados.

Na figura 15 é apresentado uma foto do hardware em funcionamento. Verifica-se que este hardware possui o leitor de LCD (*Liquid crystal display*) e foi acoplado na lateral do reservatório de forma a facilitar o monitoramento da leitura dos dados de carga de pressão. A figura 16 apresenta a placa eletrônica do hardware de coleta de dados e os componentes da mesma. Na figura 17 é apresentada a configuração experimental contemplada pelos anéis concêntricos contendo as bóias de controle de nível e de vazão de água, sendo as mesmas acopladas aos reservatórios.



Figura 15 – Foto do hardware.

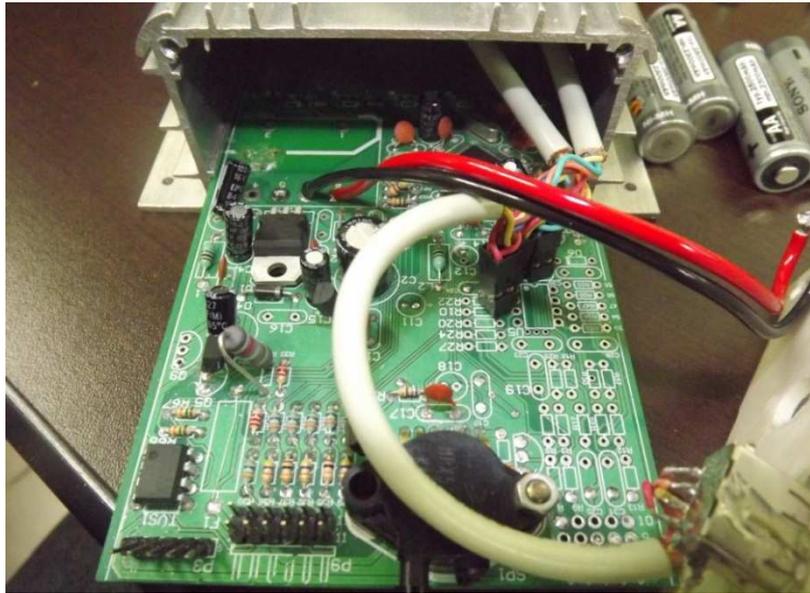


Figura 16 – Vista interna do hardware.

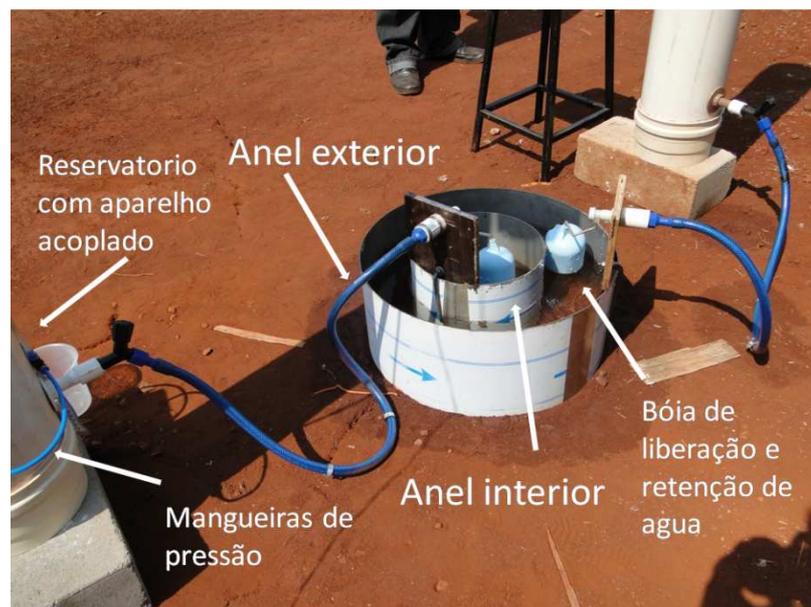


Figura 17 – Foto do sistema montado.

Já na figura 18 pode-se visualizar a interface do software e seus respectivos comandos, como também os gráficos e análises que o mesmo gerou para um experimento para teste. Esta interface permite ao usuário a inserção dos dados manualmente ou abertura de um arquivo txt gerado pelo hardware.

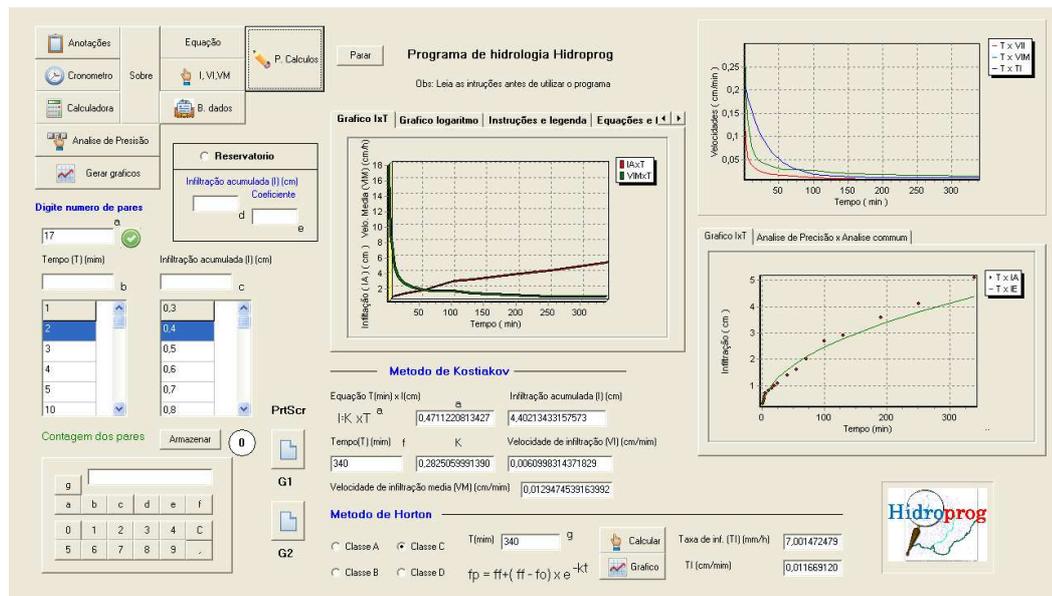


Figura 18 – interface do software.

6.1 PRECISÃO DO APARELHO

Para Aferição e verificação da precisão da leitura obtida pelo sensor foram realizados ensaios no laboratório de hidráulica do campus de Campo Mourão. Nestes ensaios foram determinadas as variações das cargas de pressão determinando a variação da altura do nível da água e comparando com os dados da leitura do equipamento desenvolvido para quantificação desta carga de pressão. Através da diferença dos valores obtidos foram realizados os ajustes necessários para melhorar a precisão do equipamento.

O teste utilizado para a aferição e verificação da precisão foi o teste ANOVA (Análise de variância) fator único, ao nível de 5% de significância, levando-se em consideração as seguintes hipóteses para as três tabelas abaixo e utilizando a distribuição de probabilidade de Fisher Snedecor (F):

$$\begin{cases} H_0 : \mu_{LCD} = \mu_{RES} \\ H_1 : \mu_{LCD} \neq \mu_{RES} \end{cases}$$

Os resultados dos testes de aferição realizado em laboratório, que consistem no estudo da leitura de pressão lidos no LCD do aparelho e no

reservatório - através de uma mangueira com graduação milimétrica transparente acoplada no mesmo. Foram realizadas análises simultâneas com a leitura no equipamento e na régua durante o esvaziamento do reservatório, com leitura de níveis a cada 1 minuto. Os valores das diferenças entre as leituras de níveis em cada tempo são apresentados nas tabelas 3, 4 e 5 para os três testes de aferição realizados. Verifica-se que as discrepância na uniformidade dos resultados foram devido ao fato de as leituras no reservatórios serem realizadas de forma visual, estando susceptível a erros.

Tabela 3 - Teste de Aferição 1

Aparelho (m)	Diferença (m)	Reservatório (m)	Diferença (m)
1,003		0,018	
0,901	0,102	0,19	0,172
0,803	0,098	0,298	0,108
0,701	0,102	0,392	0,094
0,603	0,098	0,49	0,098
0,501	0,102	0,578	0,088
0,403	0,098	0,674	0,096
0,301	0,102	0,774	0,1
0,202	0,099	0,852	0,078
0,1	0,102	0,91	0,058
0	0,1	0,978	0,068

Tabela 4 - Teste de Aferição 2

Aparelho (m)	Diferença (m)	Reservatório (m)	Diferença (m)
1,001		107,5	
0,9	0,101	94,5	0,13
0,801	0,099	87	0,075
0,702	0,099	78,2	0,088
0,6	0,102	68,2	0,1
0,502	0,098	57,6	0,106
0,4	0,102	46,6	0,11
0,302	0,098	34,8	0,118
0,2	0,102	22,2	0,126
0,102	0,098	12,4	0,098
0	0,102	3,2	0,092

Tabela 5 - Teste de Aferição 3

Aparelho (m)	Diferença (m)	Reservatório (m)	Diferença (m)
1,028		1,225	
0,899	0,129	1,09	0,135
0,789	0,11	0,98	0,11
0,702	0,087	0,888	0,092
0,6	0,102	0,785	0,103
0,502	0,098	0,687	0,098
0,4	0,102	0,589	0,098
0,302	0,098	0,494	0,095
0,2	0,102	0,397	0,097
0,102	0,098	0,307	0,09
0	0,102	0,214	0,093

Na tabela 6 são apresentados dados estatísticos levantados baseados nos três testes de calibragem, podendo-se constatar que as médias e as variâncias entre os dois grupos de cada tabela de mesma ordem de grandeza, e que a variância de cada grupo é pequena. Ainda que os valores tanto da média quanto da variância das três tabelas são próximos.

Tabela 6 – Ensaios estatísticos dos testes de Aferição

Grupo	Calibração 1		Calibração 2		Calibração 3	
	Média (m)	Variância	Média (m)	Variância	Média (m)	Variância
LCD	0,1003	3,57E-06	0,1001	3,43E-06	0,1028	0,000118
RES.	0,096	0,000951	0,1043	0,000299	0,1011	0,000175

Na tabela 7 são apresentados os resultados de aplicação da ANOVA (análise de variância) fator único, ao nível de 5% de significância, utilizando a distribuição de probabilidade F, pode-se perceber que para os três ensaios realizados o valor estatístico F encontrado foi menor que o valor estatístico F crítico, podendo aceitar a hipótese H_0 , ou seja, não existe diferença significativa entre os valores lidos no LCD e no reservatório.

Com o intuito de verificar se os ensaios forma conduzidos de forma similar, realizou-se um teste de hipóteses com critério duplo e repetição utilizando a mesma distribuição de probabilidade F, sendo os seguintes critérios avaliados:

Tabela 7 - Análise de variância dos testes de Aferição

Fonte da variação	Calibração 1		Calibração 2		Calibração 3	
	F	F crítico	F	F crítico	F	F crítico
Entre grupos	0,193678	4,413873	0,5839	4,413873	0,098654	4,413873

Amostras: corresponde aos 3 ensaios realizados:

$$\begin{cases} H_0 : \mu_{\text{ENS.1}} = \mu_{\text{ENS.2}} = \mu_{\text{ENS.3}} \\ H_1 : \text{existe pelo menos uma diferença} \end{cases}$$

Colunas: métodos utilizados (LCD e RES).

$$\begin{cases} H_0 : \mu_{\text{LCD}} = \mu_{\text{RES}} \\ H_1 : \mu_{\text{LCD}} \neq \mu_{\text{RES}} \end{cases}$$

Interações:

$$\begin{cases} H_0 : \text{não existe interação entre amostras e colunas} \\ H_1 : \text{existe interação entre amostras e colunas} \end{cases}$$

Os resultados apresentam-se a seguir:

Tabela 8 - Análise de variância com critério duplo e repetição dos testes de Aferição

Fonte da variação	F	F crítico
Amostra	0,398843	3,168246
Colunas	0,020907	4,019541
Interações	0,367224	3,168246

Para os resultados da tabela, para o critério das amostras, verifica-se que o valor de F é menor que o valor de F crítico, se aceita a hipótese H_0 , ou seja, não existe diferença entre os ensaios. Desta forma os ensaios foram conduzidos de forma similar.

Para o critério das colunas verifica-se que o valor de F é menor que o valor de F crítico se aceita a hipótese H_0 , ou seja, não existe diferença entre os métodos de medição, confirmando os testes individuais realizados anteriormente.

Para o critério de interações verifica-se que o valor de F é menor que o valor de F crítico se aceita a hipótese H_0 , ou seja, não existem interações entre ensaios e métodos, desta forma, não existe um método que tenha se comportado de maneira diferente de acordo com o ensaio realizado.

6.2 DOS ENSAIOS REALIZADOS DE FORMA TRADICIONAL

As tabelas abaixo demonstram os resultados de dois ensaios de infiltração de água um com o solo com umidade variada, o primeiro a umidade de 11% e o segundo de 8%. Na mesma região dos ensaios do presente trabalho, Lima (2009) determinou a curva granulométrica de acordo com a NBR 7181/84, e foi encontrado os seguintes valores: 45% de silte, 35% de areia e 20% de argila.

Tabela 9 - Dados de infiltração do ensaio realizado manualmente a uma umidade de 11%

Leitura (min)	Infiltração (cm)	Infiltração (cm) acumulada	Velocidade (cm/min) media
0			
1	0,3	0,3	0,3
2	0,3	0,6	0,3
3	0,2	0,8	0,27
4	0,1	0,9	0,25
5	0,1	1	0,2
10	0,1	1,1	0,11
15	0,2	1,3	0,09
20	0,1	1,4	0,07
25	0,5	1,9	0,08
40	0,2	2,1	0,05
55	0	2,1	0,04
70	0,4	2,5	0,04
100	0,8	3,3	0,03
130	1	4,3	0,03
190	0,6	4,9	0,03
250	1,1	6	0,02
340	1,4	7,4	0,02

Na figura 19 pode-se visualizar a comparação entre os 17 pontos de infiltração coletados pelo equipamento e a equação de infiltração determinada a partir dos mesmos pontos. Interessante verificar que a infiltração inicial do solo é alta no início do ensaio e apenas por volta de 100 minutos visualmente a mesma começa tender a ficar constante. Neste ensaio de infiltração acumulada no tempo de 340 minutos foi encontrado através da equação de Kostiakov uma infiltração de 6,30 cm.

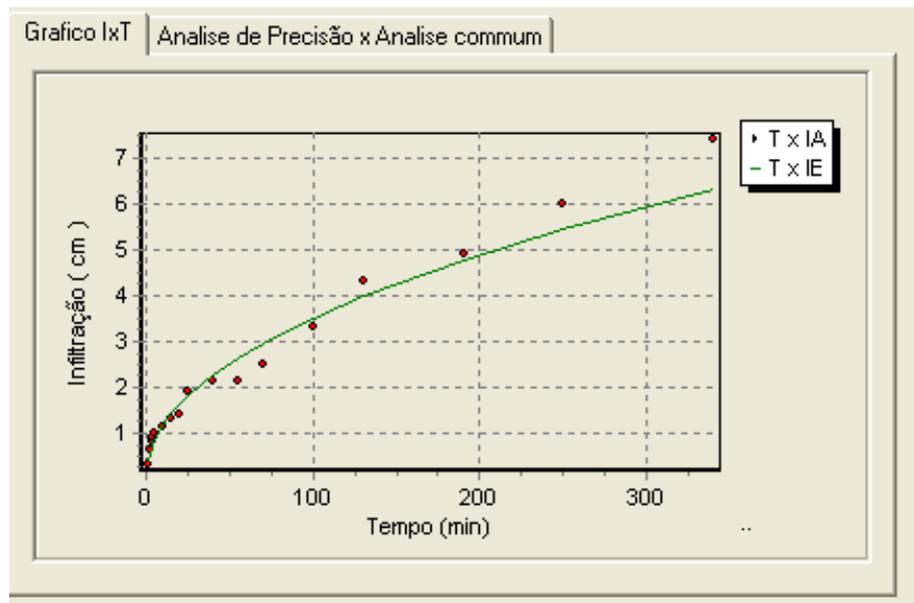


Figura 19 - Infiltração acumulada plotada em forma de equação e pontos, obtida através da equação de Kostiakov feita com 17 pontos de amostra de infiltração.

Pode-se observar na figura 20 que as velocidades inicial são elevada nas três formas apresentadas, com um declínio rápido, que começa a ficar constante próximo aos 100 minutos de ensaio. As três velocidades tendem a se aproximarem com o decorrer do tempo. É pertinente citar que não se percebe nenhuma oscilação nos valores apresentados nos gráficos. No tempo de 340 minutos de ensaio a velocidade instantânea encontrada foi de $0,0088 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$ a velocidade media foi de $0,01853 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$ e a taxa de infiltração foi de $0,0116 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$.

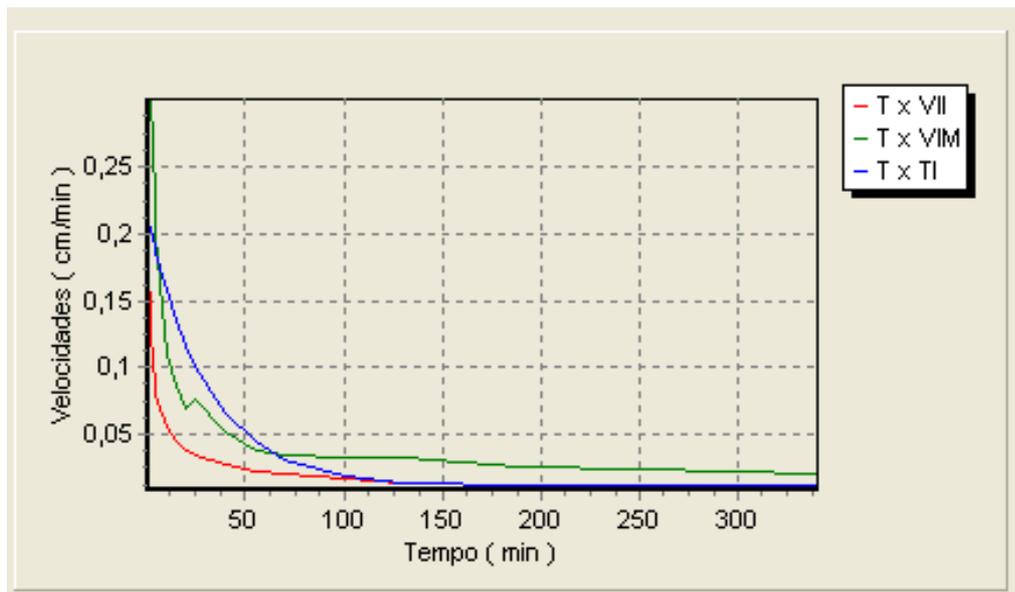


Figura 20 - Velocidade instantânea, média e taxa de infiltração em função do tempo obtida através de 17 pontos de infiltração.

Tabela 10 - Dados de infiltração do ensaio realizado manualmente a uma umidade de 8%.

Leitura (min)	Infiltração (cm)	Infiltração (cm) acumulada	Velocidade (cm/min) media
0			
1	0,3	0,3	0,3
2	0,1	0,4	0,2
3	0,1	0,5	0,17
4	0,1	0,6	0,15
5	0,1	0,7	0,14
10	0,1	0,8	0,08
15	0,1	0,9	0,06
20	0,1	1	0,05
25	0,1	1,1	0,04
40	0,3	1,4	0,04
55	0,2	1,6	0,03
70	0,4	2	0,03
100	0,7	2,7	0,03
130	0,2	2,9	0,02
190	0,7	3,6	0,02
250	0,5	4,1	0,02
340	1	5,1	0,02

Na figura 21 pode-se visualizar a comparação entre os 17 pontos de infiltração coletados pelo equipamento e a equação de infiltração determinada a

partir dos mesmos pontos. Interessante verificar que a infiltração inicial do solo é alta no início do ensaio e apenas por volta de 100 minutos visualmente a mesma começa tender a ficar constante. Neste ensaio de infiltração acumulada no tempo de 340 minutos foi encontrado através da equação de Kostiakov uma infiltração de 4,402 cm.

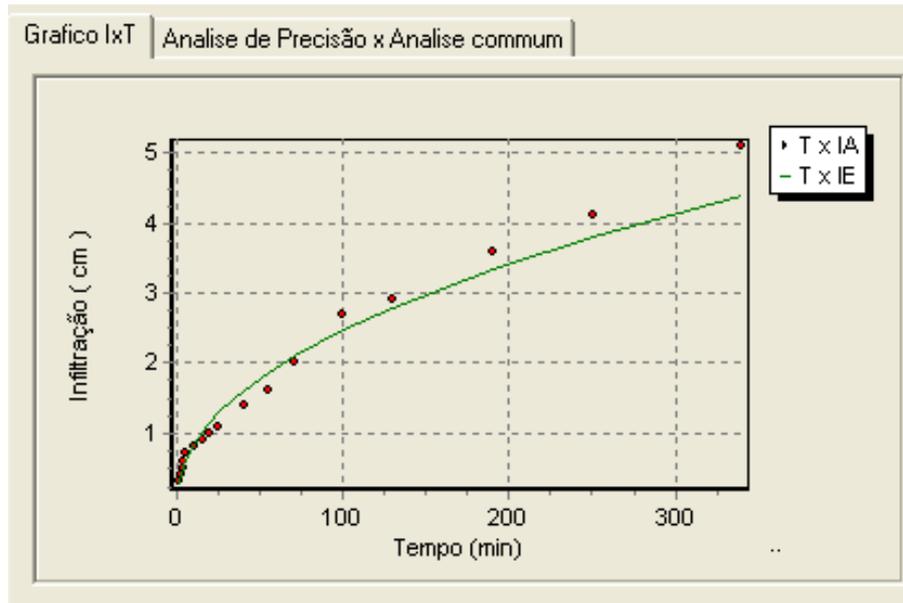


Figura 21- Infiltração acumulada plotada em forma de equação e pontos, obtida através da equação de Kostiakov feita com 17 pontos de amostra de infiltração.

Pode-se observar na figura 22 que as velocidades iniciais são elevadas nas três formas apresentadas, com um declínio rápido, que começa a ficar constante próximo aos 100 minutos de ensaio. As três velocidades tendem a se aproximarem com o decorrer do tempo. É pertinente citar que não se percebe nenhuma oscilação nos valores apresentados nos gráficos. No tempo de 340 minutos de ensaio a velocidade instantânea encontrada foi de $0,0060 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$, a velocidade média foi de $0,0129 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$ e a taxa de infiltração foi de $0,0116 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$.

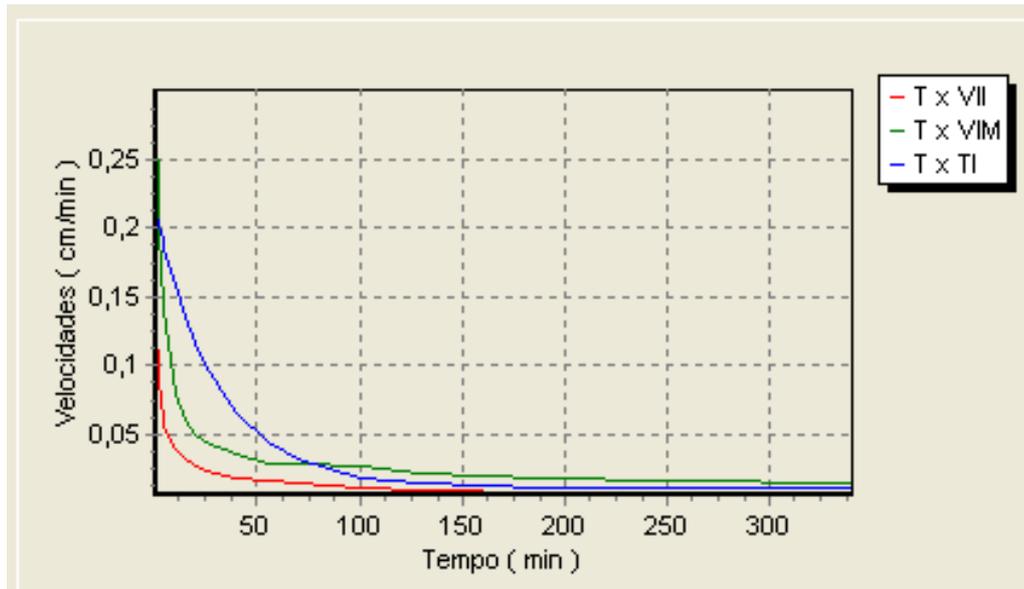


Figura 22 - Velocidade instantânea, média e taxa de infiltração em função do tempo obtida através de 17 pontos de infiltração.

6.3 DO ENSAIO REALIZADO DE FORMA AUTOMATIZADA

A partir dos dados coletados foi possível calcular a equação de Kostiakov, formar os gráficos de infiltração, velocidade média e instantânea em função do tempo e a taxa de infiltração obtida pelo método de Horton. Devido à utilização de automatização no ensaio foram obtidos os dados numéricos do ensaio em maior quantidade e gerado gráfico de infiltração em função do tempo e os comparados com o gráfico feito com números de coletas convencionais também automatizadas. Sendo estes resultados apresentados nas imagens mais abaixo.

Tempo(min)	Inf.Acumulac
1	0,624
2	1,196
3	1,56
4	1,768
5	1,768
10	2,184
15	2,392
20	2,808
25	2,808
40	3,224
55	3,64
70	3,848
100	4,628
130	5,668
190	7,488
250	9,36
340	11,596

Figura 23 - Dados de infiltração coletados pelo aparelho.

Pode-se observar na figura 24 que as velocidades iniciais são elevadas nas três formas apresentadas, com um declínio rápido, que começa a ficar constante próximo aos 100 minutos de ensaio. As três velocidades tendem a se aproximarem com o decorrer do tempo. É pertinente citar que não se percebe nenhuma oscilação nos valores apresentados nos gráficos. No tempo de 340 minutos de ensaio a velocidade instantânea encontrada foi de $0,0109 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$, a velocidade média foi de $0,0265 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$. e a taxa de infiltração foi de $0,0116 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$.

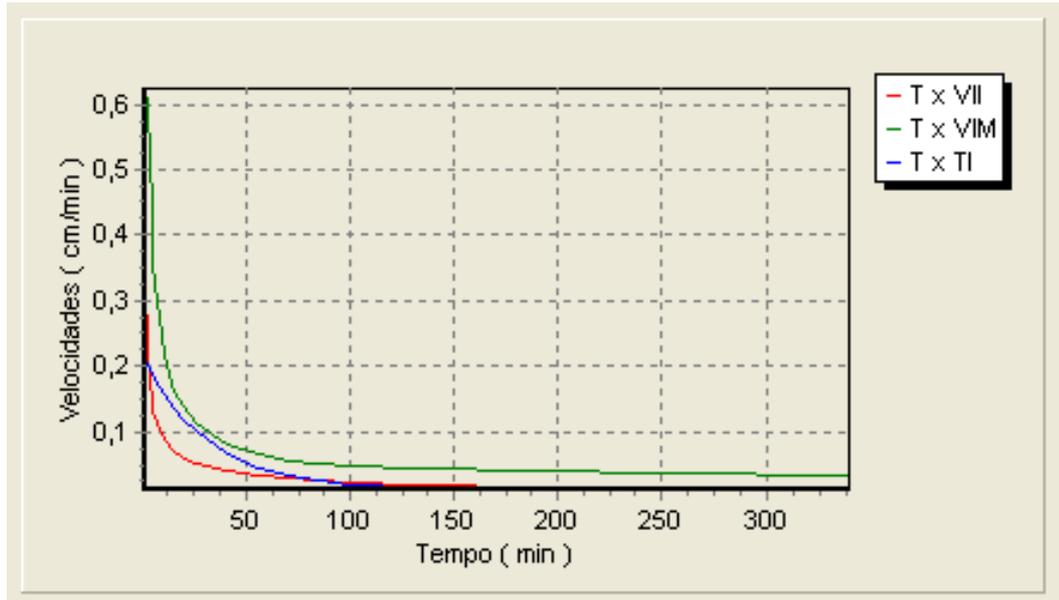


Figura 24 - Velocidade instantânea, média e taxa de infiltração em função do tempo obtida através de 17 pontos de infiltração.

Na figura 25 pode-se visualizar a comparação entre os 17 pontos de infiltração coletados pelo equipamento e a equação de infiltração determinada a partir dos mesmos pontos. Interessante verificar que a infiltração inicial do solo é alta no início do ensaio e apenas por volta de 100 minutos visualmente a mesma começa tender a ficar constante. Neste ensaio de infiltração acumulada no tempo de 340 minutos foi encontrado através da equação de Kostiakov uma infiltração de 9,030 cm.

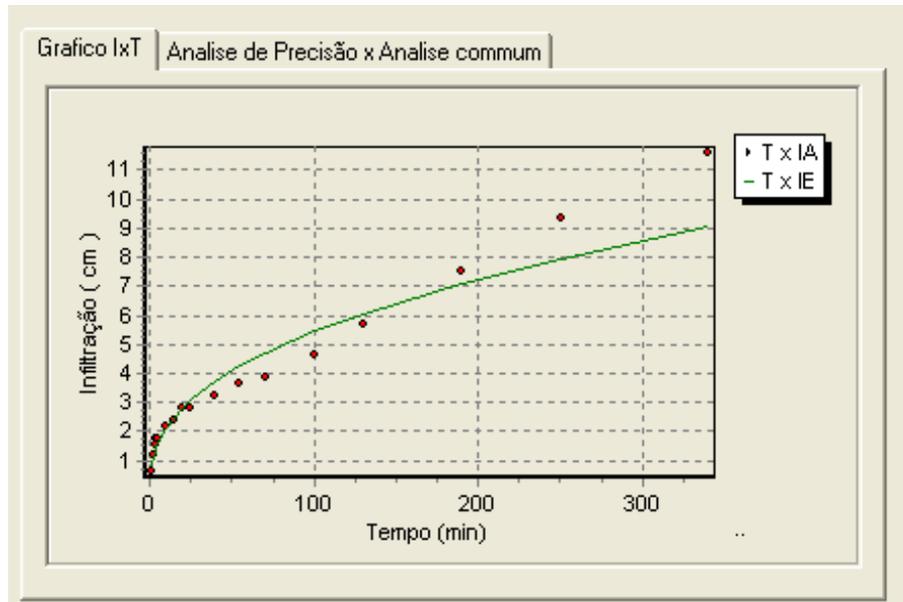


Figura 25 - Infiltração acumulada plotada em forma de equação e pontos, obtida através da equação de Kostiakov feita com 17 pontos de amostra de infiltração.

Pode-se observar na figura 26 a linearização da equação de Kostiakov obtida através dos 17 pontos de infiltração coletado pelo equipamento.

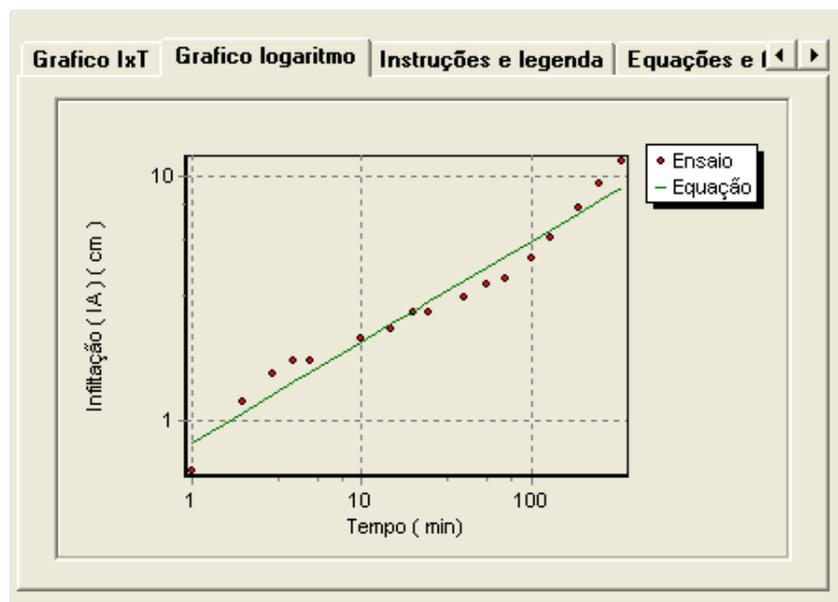


Figura 26 - linearização da equação de Kostiakov obtida através dos 17 pontos de infiltração.

Na figura 27 pode-se visualizar o comportamento da equação infiltração de água e velocidade média de infiltração em função do tempo. Verifica-se que a velocidade inicia-se elevada e decresce rapidamente.

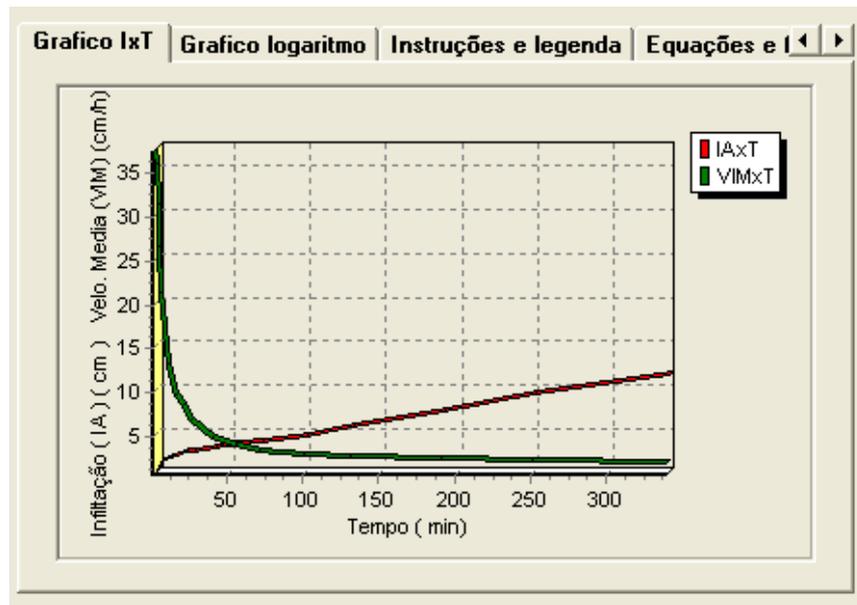


Figura 27 - Curva infiltração acumulada e velocidade média de infiltração em função do tempo referente a equação de Kostiakov obtida através dos 17 pontos de infiltração.

Na figura 28 podem-se visualizar as duas curvas de infiltração em função do tempo, sendo a linha azul a partir de 17 e a linha verde de 340 pontos numéricos de infiltração de água obtidos automaticamente pelo equipamento. Podendo-se verificar uma diferença inicial pequena mais crescente entre as duas em função do tempo, no final a infiltração acumulada referente a equação de 17 pontos foi de 9,030 cm. e a referente a 340 foi de 10,10 cm. Observando que a equação referente ao item “IA(17)xT” da legenda não esta plotada pois não é objeto de estudo para o exemplo.

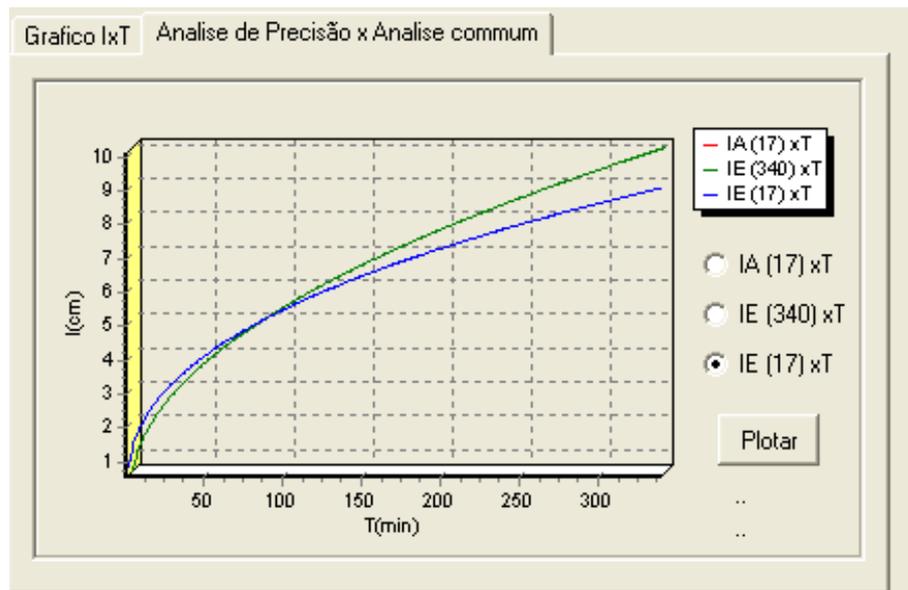


Figura 28 - Curva infiltração acumulada em função do tempo, apartir da equação formada por 17 pontos e 340 pontos de infiltração.

Referente à equação formada por 17 pontos e 340 pontos de infiltração, observa-se suas variáveis de interpolação nas duas tabelas abaixo. Pode-se constatar na tabela 1 que as diferenças nos valores das variáveis encontrados são expressivos e ainda podendo observar as consequências desta diferenças apresentadas na tabela 9.

Tabela 11 – Diferenças da equação de kostiakov formada com 17 e 340 pontos de estudo em relação a suas variáveis.

Variavel	Equação 17 pontos	Equação 340 pontos
M	0,4132	0,5007
K	0,8121	0,5453

Pode-se observar ainda na tabela 9 que a diferença dos resultados cresce exponencialmente em função do tempo tanto em unidade de infiltração ou em porcentagem de diferença de infiltração. Considerando a diferença de 5% nos resultados como o valor de limite de relevância, o tempo de ensaio aproximado para considerar a influência do número de pontos do ensaio é por volta de 1 hora e 10 minutos.

Tabela 12 – Diferenças da equação de kostiakov formada com 17 e 340 pontos de infiltração em relação a infiltração de água.

Tempo (min)	Equação 17 Pontos Infiltração (cm)	Equação 340 Pontos Infiltração (cm)	Diferença (cm)	Porcentagem (%)
60	4,4094	4,2377	0,1717	3,8
1440	16,3952	20,8109	4,4157	21
10080	36,6377	55,1424	18,5047	33

7 CONCLUSÕES

O resultado do ensaio de infiltração é função predominantemente da umidade que se encontra o solo e das características físicas e composição do mesmo e compactação. Sendo os outros parâmetros podendo ser controlados ou são desprezíveis por sua relevância na no resultado do experimento.

Os resultados que temos de outros ensaios são o de Lima (2009) que realizou 2 ensaios e chegou a uma diferença de 15 % e que equivale a 4,6 cm na infiltração em 300 minutos de experimento. Observando-se que em seu trabalho não foi abordado nada sobre diferentes características do solo dos pontos de ensaio e sobre as questões envolvendo o próprio ensaio. Já nos dois ensaios que foram realizados de forma comum no presente trabalho apresentaram uma diferença de 2,3 centímetros que equivale a uma diferença de 31%.

Os resultados numéricos encontrados devido à automatização da aquisição de dados e realização de cálculos através de programas não permitiram a identificação dos efeitos exclusivos dos sistemas automatizados, pois a diferença de resultados entre ensaios em uma mesma área de experimento são relevantes com ordem de grandeza próximas aos benefícios proveniente automatização do sistema.

Para este trabalho buscou-se alcançar um índice de aproximação de 5% de diferença nos resultados. Este índice foi encontrado na diferença entre os resultados obtidos no campus com o ensaio realizado de maneira comum. Em termos de benefícios técnicos, a automatização do sistema permite um melhor aproveitamento tempo de ensaio e maior precisão nas coletas dos dados.

Sendo que não foi encontrado nenhum estudo sobre a influência da umidade do solo e das diferentes características físicas e da composição do solo de cada ponto de ensaio na área de estudo na variação de infiltração de água no solo, no Campus Campo Mourão da UTFPR. Logo nos três ensaios realizados os resultados se mostraram com uma aproximação de mesma grandeza. Com a umidade do solo muito próxima.

Baseado nos testes físicos e estatísticos realizados, podemos concluir que não existe diferença significativa ($p=0,05$) entre os valores lidos pela máquina e pelo método convencional, logo concluímos que o aparelho se mostrou eficiente e viável tecnicamente.

No que diz respeito à equação formada por 17 pontos e 340 temos os dois pelo ensaio automatizado percebe-se uma diferença de resultados que se comporta exponencialmente. Mostrando-se desde o primeiro minuto um percentual de diferença com valor numérico expressivo. Mas isto para o ensaio para o solo estudado, a expressividade dos resultados poderia ser diferente se fosse outro tipo de solo.

REFERÊNCIAS

CAMPO MOURÃO. **Município de Campo Mourão.** Disponível em <<http://www.campomourao.pr.gov.br/cidade/clima.php>> Acesso em 07 de abril de 2012.

CAMPO MOURÃO. **Paraná Turismo.** Disponível em <<http://www.paranaturismo.com.br>> Acesso em 12 de abril de 2013.

CARVALHO, D. F e SILVA, L. D. B. **Capítulo 5: hidrologia. 2006.** Disponível em: <http://www.ufrrj.br/institutos/it/deng/leonardo/downloads/APOSTILA/HIDRO-Cap5-INF.pdf> Acesso em 24 de março de 2012.

CARVALHO, M. A. R. **Efeito da cobertura do solo e de praticas de controle de erosão nas perdas de água e solo por escoamento superficial.** 2009. Tese (Doutor em Agronomia. Area de concentração: irrigação e drenagem) , Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba , 2009.

CASTRO, L. G. **dinamica da agua em terraços de infiltração.** 2001. Tese (Doutorado em agronomia, área de consentração: solos e nutrição de plantas) , Universidade de São Paulo, São Paulo , 2001.

FIORIN, T.T. **Estimativa da infiltração de água no solo a partir de pedofunções .** 2008. Tese (Doutorado em ciência do solo) , Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Santa Maria , 2008.

GARCEZ, L.N.; ALVAREZ, G.A. **Hidrologia. 2 ed.** São Paulo: Edgard Blücher LTDA. 1988.

LIMA, C. **determinação da curva de infiltração de água em um latossolo roxo utilizando o infiltrômetro de pressão.** 2009. TCC (tecnologia em gerenciamento ambiental) , Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão , 2009.

MUSGRAVE, G. **How much of the rain enters in the soils.** Departament of Agriculture, Washington, USA: The yearbook of agriculture. p. 151-159, 1955.

NAIME, J. M. **Um novo método para estudos dinâmicos in sut, da infiltração da água da região não saturada do solo .** 2001. Tese (Doutorado em ciências da engenharia ambiental) , Universidade de São Paulo, Carlos , 2001.

NOBRE, E.M.G. **Estudo experimental da condutividade hidráulica de solo argiloso compactado: contaminação por gasolina.** Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Engenharia Civil. 2004.

PEREIRA, F.A.C.; FONSECA. A.A.O.; ALMEIDA. E.C.A.; MOREIRA C. S.; MACEDO. D. J. B. ; CRUZ. J. D. **Comparação Entre Condutividade Hidráulica Saturada Determinada Em Campo E Laboratório.** Magistra, Cruz Das Almas-Ba, V. 13, N. 1, jan./jun., 2001.

SILVEIRA, G. M. **Análise de sensibilidade de hidrogramas de projeto aos parâmetros de sua definição indireta** . 2010. Dissertação (Mestre engenharia civil) , Universidade de São Paulo, São Paulo , 2010.

SOARES, J. M. D.; PINHEIRO, R. J. B.; TAVAREZ I. S. **Notas de aula mecânica dos solos.** 2006. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria , 2006.

SOUZA, V. C.B. **Estrudo experimental de trincheiras de infiltração no controle da geração de escoamento superficial** . 2002. Dissertação (Mestre engenharia de recursos hídricos e saneamento ambiental) , Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre , 2002.

TOMAZ, P. **Capítulo 86: Infiltração pelo Método de Horton** . 2010. Disponível em: http://www.pliniotomaz.com.br/downloads/capitulo_86_infiltracao_hrton.pdf Acesso em 24 de março de 2012.

SOARES, J. M. D.; PINHEIRO, R. J. B.; TAVAREZ I. S. **Notas de aula mecânica dos solos.** 2006. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria , 2006.