

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DIRETORIA DE GRADUAÇÃO E EDUCAÇÃO PROFISSIONAL
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL**

VICTOR HUGO PARUSSOLO ZIMMERMANN

**DESENVOLVIMENTO DE EQUIPAMENTO AUTOMATIZADO PARA
MEDIDAS DE PERMEABILIDADE HIDRÁULICA DO SOLO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

MEDIANEIRA

2016

VICTOR HUGO PARUSSOLO ZIMMERMANN

**DESENVOLVIMENTO DE EQUIPAMENTO AUTOMATIZADO PARA
MEDIDAS DE PERMEABILIDADE HIDRÁULICA DO SOLO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental, do Curso de Engenharia Ambiental, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, campus Medianeira.

Orientador: Prof.^a Dr.^a Fabiana Costa de Araujo Schutz

Co-orientador: Prof. Me. Hamilton Pereira da Silva

MEDIANEIRA

2016



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Ponta Grossa

Nome da Diretoria
Nome da Coordenação
Nome do Curso



TERMO DE APROVAÇÃO

DESENVOLVIMENTO DE EQUIPAMENTO AUTOMATIZADO PARA MEDIDAS DE PERMEABILIDADE HIDRÁULICA DO SOLO

por

VICTOR HUGO PARUSSOLO ZIMMERMANN

Este Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) foi apresentado às 17:00 do dia 23 de junho de 2016, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof.^a Dr.^a Fabiana Costa de A. Schutz
Orientadora

Prof. Me. Hamilton Pereira da Silva
Co-orientador

Prof.^a Dr.^a Carla Cristina Bem
Membro titular

Profa. Dr. Agostinho Zanini
Membro titular

- O Termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação do Curso -

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por estar sempre presente e me proporcionar saúde, equilíbrio e paz para trilhar os longos caminhos da evolução.

A instituição de ensino e todos os profissionais responsáveis por gerenciar e executar de maneira ética e moral suas funções na máquina pública, em especial ao corpo docente do departamento de ciências biológicas e ambientais.

A minha orientadora, Profa. Dra. Fabiana Costa de Araujo Schutz e ao meu co-orientador, Prof. Me. Hamilton Pereira da Silva, por toda ajuda e cooperação na execução deste trabalho.

Aos meus pais, Luiz Carlos e Yara Regina, aos meus irmãos, Thiago e Mariana, e a minha namorada, Laina, que estiveram sempre ao meu lado, me apoiando em todas as minhas decisões e que sempre me incentivaram e acreditaram no meu potencial ao longo de todo esse período.

Aos colegas e amigos que passaram por minha vida ao longo da graduação e que de certa forma contribuíram, cada um a sua maneira, para a construção e formação do cidadão e pessoa que hoje eu sou e, por conseguinte, a elaboração deste trabalho.

“Leve na sua memória para o resto de sua vida, as coisas boas que surgiram no meio das dificuldades. Elas serão uma prova de sua capacidade em vencer as provas e lhe darão confiança na presença divina, que nos auxilia em qualquer situação, em qualquer tempo, diante de qualquer obstáculo.” (XAVIER, Francisco)

RESUMO

ZIMMERMANN, Victor Hugo Parussolo. **Desenvolvimento de equipamento automatizado para medidas de permeabilidade hidráulica do solo.** 2016. 39 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Medianeira, 2016.

A identificação das propriedades físicas e químicas dos solos é de extrema importância para a manutenção de sistemas ambientais. Dentre estas diversas propriedades, destaca-se a condutividade hidráulica do solo que nos permitirá encontrar o grau de permeabilidade de cada tipo de solo em função do tempo. Um parâmetro importante no dimensionamento de projetos ambientais e agrícolas, tais como: construção de aterros, barragens, drenagem de superfície etc. Este trabalho objetivou desenvolver um permeâmetro de Guelph, instrumento de medição da condutividade hidráulica do solo, de baixo custo, com leitura do nível de carga automatizada. Avaliaram-se os materiais mais apropriados para a composição estrutural do equipamento para efetuar sua construção, que após ser concluída, avaliou-se sua efetividade de funcionamento. Para isto aplicou-se o método de estágio único para solos saturados e constatou-se a eficiência do equipamento para medir as diferenças de altura da coluna d'água no interior do instrumento em intervalos de tempo extremamente curtos, devido à precisão implicada pela inovação automatizada, além dos valores de condutividade hidráulica encontrados serem analogamente semelhantes aos resultados de um permeâmetro comercial do mesmo tipo. Sendo assim, o projeto alcançou as metas inicialmente propostas superando as expectativas com relação ao funcionamento, custo de aquisição e facilidade de execução.

Palavras-chave: Condutividade hidráulica. Permeâmetro. Automatização.

ABSTRACT

ZIMMERMANN, Victor Hugo Parussolo. **Development of automated equipment for soil hydraulic permeability measurements**. 2016. 39 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Medianeira, 2016.

The identification of the physical and chemical properties of the soil is extremely important for the maintenance of environmental systems. Among these various properties, there is the hydraulic conductivity will allow us to find the degree of permeability of each soil type as a function of time. An important parameter in the design of environmental and agricultural projects, such as construction of embankments, dams, surface drainage etc. This study aimed to develop a Guelph permeameter, measuring instrument soil hydraulic conductivity, low cost, automated reading charge level. Evaluated the most appropriate materials for the structural composition of the equipment to perform its construction, which after being completed, was evaluated its effectiveness of operation. For this we applied the single stage method of saturated soils and found that the efficiency of the equipment for measuring the height differences of the water column inside the instrument in extremely short time intervals due to the accuracy implied by automated innovation in addition to the hydraulic conductivity values, being found analogously similar to those of a commercial permeameter of the same type. Thus, the project achieved the initially proposed goals surpassing the expectations of operation, cost and ease of implementation.

Keywords: Hydraulic conductivity. Permeameter. Automation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fatos de forma (C).....	11
Figura 2 - Bulbo saturado.....	15
Figura 3 - Modelo base.	19
Figura 4 - Desenho de projeto do permeâmetro.....	20
Figura 5-a - Tubo de PVC 60 mm e 25 mm, ambos com 1 metro de comprimento. .	21
Figura 5-b - Redução de PVC.	21
Figura 5-c - Registro de gaveta.....	21
Figura 5-d - Tripé.....	22
Figura 5-e - Placa Arduino MEGA.....	22
Figura 5-f - Multiplexador (cd 4067).	22
Figura 5-g - Flat cable.	23
Figura 5-h - Agulhas número 8.....	23
Figura 5-i - Relógio em tempo real.....	23
Figura 5-j - Dispositivo Bluetooth.....	24
Figura 6 - Tubo perfurado pela CNC.....	25
Figura 7 - Instalação das sondas.	25
Figura 8 - Gabarito do multiplexador.	26
Figura 9 - Placa com os multiplexadores dentro da caixa de proteção.	26
Figura 10 - Protótipo finalizado.....	28

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	6
2. OBJETIVO GERAL	8
2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	8
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	9
3.1 CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA	9
3.2 FLUXO DE ÁGUA NO SOLO	10
3.2.1 Fluxo Saturado	10
3.2.2 Fluxo Não-Saturado	12
3.2.2.1 Potencial matricial de fluxo	12
3.3 PERMEABILIDADE SATURADA	13
3.4 MÉTODOS PARA LEVANTAMENTO DA CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA	14
3.4.1 Permeâmetro de Guelph	15
3.5 MICROCONTROLADORES	16
3.6 ARDUINO.....	17
4 MATERIAL E MÉTODOS	19
4.1 MATERIAIS	20
4.2 CONSTRUÇÃO	24
4.3 MÉTODO APLICADO.....	27
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	28
5.1 TESTES DE VERIFICAÇÃO	30
6 CONCLUSÃO	32
REFERÊNCIAS	33

1 INTRODUÇÃO

O monitoramento da qualidade do solo pelos atributos físicos é importante para a manutenção e avaliação da sustentabilidade dos sistemas ambientais. Este monitoramento propicia melhor qualidade no uso de matérias-primas e dos recursos naturais, reduzindo a degradação ambiental (DORAN & PARKIN, 1994).

Dentre os atributos físicos importantes para este estudo, está a análise da permeabilidade do solo, que indiretamente determina a infiltração de água no solo. Este é o processo de entrada de água através da superfície do solo. A taxa de entrada de água no solo decresce com o tempo em função do umedecimento do perfil assumindo um valor mínimo constante denominado de velocidade de infiltração básica (VIB).

Entende-se por permeabilidade a capacidade de um determinado solo, sob condições normais, em permitir a passagem de água (ou outro fluido) através de seus vazios. A permeabilidade dos solos varia com o número de vazios contidos neste. Em quase toda a totalidade dos estudos ambientais relacionados ao solo, o fluido considerado, é a água. Esta, quando submetida a diferenças de potenciais, se desloca no interior dos solos causando tensões. Esse estudo é de grande utilidade na Engenharia Ambiental, viabilizando cálculos e vazões, na análise de recalques e também no estudo de estabilidade.

No estudo e dimensionamento de projetos ambientais e agrícolas, tais como barragens, reservatórios, drenagem de superfície, irrigação, projetos de aterros sanitários entre outros, os valores corretos de velocidade de infiltração são fundamentais (SOBRINHO, 1997).

Existem diversos métodos de determinação dos valores da VIB e vários pesquisadores avaliaram e comparam os métodos existentes, principalmente utilizando, permeâmetros, infiltrômetros de aspersão ou simuladores de chuva e infiltrômetro de anéis concêntricos (LEVIEN et al. 2000). Dentre estas metodologias, o permeâmetro é um equipamento para determinação da infiltração de água no solo, da condutividade hidráulica saturada, do potencial matricial e da sortividade (REYNOLDS e ELRICK, 1985). Castro (1995) ressalta a possibilidade da utilização

de um grande número de determinações com o permeâmetro, principalmente devido à simplicidade e rapidez do método.

Segundo Pinto (2005), o Permeâmetro Guelph® apresenta inúmeras vantagens, devido a sua facilidade e praticidade de transporte e operação, a rapidez na execução dos ensaios. Por se tratar de um equipamento que permite o ensaio de campo, um volume muito maior de solo pode ser analisado com a vantagem da eliminação dos problemas com amolgamento das amostras indeformadas e a dificuldade de amostragem para solos arenosos, porém, o seu custo dificulta a aquisição por parte das instituições de ensino e para desenvolvimento desses estudos, o projeto buscou materiais alternativos que reduzissem o custo do equipamento em até 50 vezes quando comparado ao valor comercial.

2. OBJETIVO GERAL

Projetar e construir um equipamento baseado no modelo do Permeâmetro de Guelph com a utilização de sensores para leitura dinâmica.

2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Testar e validar os resultados do equipamento.

- Montar e testar um dispositivo eletrônico para monitorar a evolução da coluna de água de carga constante no permeâmetro.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA

Segundo Cabral (2000), nos estudos hidrogeológicos a obtenção das propriedades hidráulicas do solo é essencial para a caracterização adequada do meio físico. A condutividade hidráulica, que pode ser correlacionada com a permeabilidade, refere-se à facilidade da formação aquífera de exercer a função de um condutor hidráulico sendo uma propriedade chave na descrição dos processos de fluxo da água subterrânea.

A condutividade hidráulica do solo está relacionada com as propriedades físicas, tanto dos fluídos como dos materiais por onde a água passa, e retrata a facilidade com que a água percola através do solo. Os valores de condutividade hidráulica de diferentes tipos de solo, segundo a classificação de Terzaghi & Peck (1967) e Mello & Teixeira (1967) estão apresentados na tabela a seguir (CELLIGOI, 2000).

Tabela 1 - Valores de condutividade hidráulica.

Coeficiente de Permeabilidade k (cm/s)	Grau de Permeabilidade Terzaghi & Peck (1967)	Tipo de Solo Mello & Teixeira (1967)
10 ⁰ a 1	Alta	Pedregulhos e Areia
1 a 10 ⁻¹	Alta	Areias
10 ⁻¹ a 10 ⁻³	Média	Areias
10 ⁻³ a 10 ⁻⁵	Baixa	Areias finas siltosas e argilosas, siltes argilosos
10 ⁻⁵ a 10 ⁻⁷	Muito Baixa	Areias finas siltosas e argilosas, siltes argilosos
<10 ⁻⁷	Praticamente Impermeável	Argilas

Fonte: Adaptado de Santos (2005)

“O permeâmetro de Guelph é projetado para medir a condutividade entre 10^{-2} e 10^{-6} cm/s. Abaixo ou acima destas ordens de grandeza, as medições apresentam erros ou não se consegue realizar o ensaio.” Fonte: (AGUIAR, 2001).

3.2 FLUXO DE ÁGUA NO SOLO

Dentro do solo a água pode se movimentar de três maneiras distintas, sendo classificadas dentre elas, como: fluxo saturado, fluxo não saturado, e movimento de vapor. Em todos os casos o fluxo de água age em resposta a gradientes de energia, com movimento de água de uma zona de maior para uma de menor potencial de água (ÁGUA ...,p 20).

3.2.1 Fluxo Saturado

O fluxo saturado ocorre quando os poros do solo estão completamente preenchidos (ou saturados) com água, isto pode acontecer com frequência nos perfis mais profundos dos solos e ocasionalmente nos horizontes superficiais quando ocorridos períodos de precipitação (ÁGUA ...,p 20).

A medida da condutividade hidráulica do solo saturado (K_{fs}) será interpretada pela equação proposta por Reynolds et al. (1983), deduzida a partir da Lei de Darcy, como demonstrado na seguinte equação:

$$K_{fs} = \frac{CQ}{\left(2\pi H^2 + \pi a^2 C + \frac{2\pi H}{\alpha}\right)} \quad \text{Eq. (1)}$$

Onde:

- K_{fs} = condutividade hidráulica saturada de campo (m/s);

- Q = vazão a carga constante (m^3/s);
- C = fator de forma;
- a = raio do furo (m);
- H = altura de água constante (m);
- α = constante (função das propriedades do solo);

O fator de forma, C é um parâmetro que depende da relação H/a e do tipo de solo. Os valores de C podem ser encontrados graficamente para três classes de solos (textura e macroporosidade), bem como o valor da constante α .

Tabela 2 - Valores α sugeridos (ELRICK et al, 1989) em função da macroporosidade e textura do solo.

α (cm^{-1})	TIPO DE SOLO
0,01	Argilas compactas (aterros, liners, sedimentos lacustres e marinhos)
0,04	Solos de textura fina, principalmente sem macroporos e fissuras.
0,12	Argilas até areias finas com alta a moderada quantidade de macroporos e fissuras.
0,36	Areia grossa inclui solos com macroporos e fissuras.

Fonte: Adaptado de ELRICK et al. (1989).

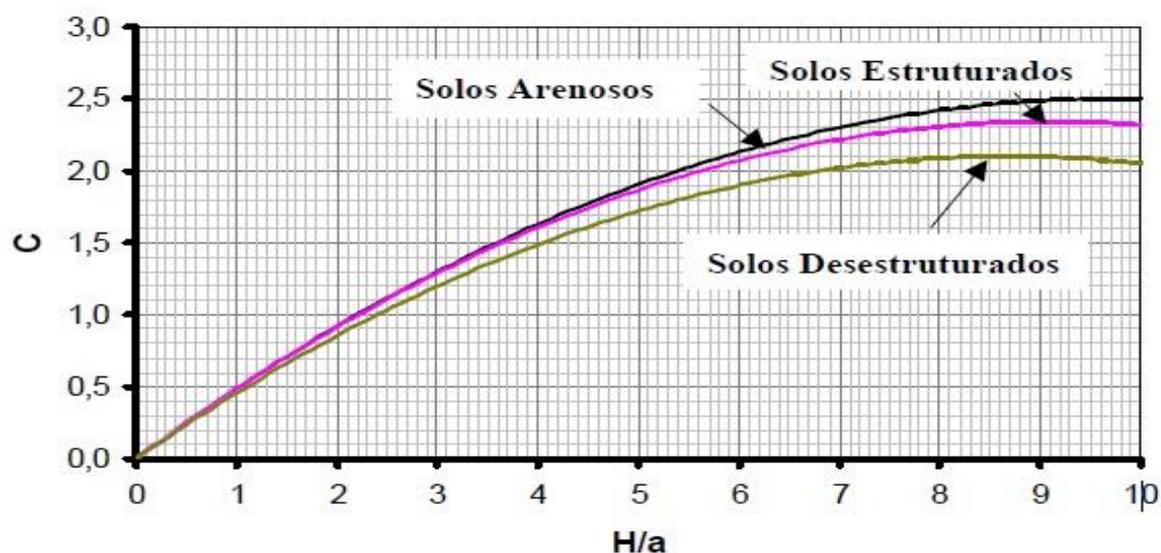


Figura 1 - Fatos de forma (C)

Fonte: Lisboa (2006).

3.2.2 Fluxo Não-Saturado

O fluxo não saturado ocorre quando os poros grandes no solo estão preenchidos com ar, deixando apenas os menores poros para reter e transmitir água. Este fator influencia diretamente na variação do fluxo de água no solo por dificultar os cálculos que demonstrem a taxa de infiltração e a direção do líquido percolado. A força que ocasiona a movimentação do líquido no interior dos solos não é mais a gravitacional como no caso do fluxo saturado, mas sim a diferença de potencial hídrico, porém em casos de fluxo não-saturado, o potencial mátrico agirá como força motriz no processo fazendo com que o movimento seja de zonas com potencial mátrico alto para zonas de potencial mátrico baixo (ÁGUA ..., p. 25).

O modelo para cálculo da condutividade hidráulica do solo é baseado na equação de Richards (1931), para fluxo permanente em furo cilíndrico, adicionando-se uma variável que representará a parcela responsável pelo fluxo não saturado, referente ao potencial matricial de fluxo (SOTO et al., 2009).

$$Q = \left[\frac{2\pi H^2}{C} + \pi a^2 \right] Kfs + \left[\frac{2\pi H}{C} \right] \phi Gm \quad \text{Eq. (2)}$$

Onde:

- Q = vazão a carga constante (m³/s);
- H = altura de água constante no furo de sondagem (m);
- Kfs = condutividade hidráulica saturada medida *in situ* (m/s);
- a = raio do furo de sondagem (m);
- ϕGm = potencial matricial de fluxo (kPa);
- C = fator de forma;

3.2.2.1 Potencial matricial de fluxo

“Define-se o conceito de potencial, como sendo a energia necessária para deslocar uma unidade de massa de água, em sentido

contrário ao das forças capilares, de um certo local até o nível de água livre, sujeita à pressão atmosférica.” (LISBOA, 2006).

Segundo Lisboa (2006), este potencial é decorrente do efeito combinado entre as forças capilares e de adsorção resultantes das interações realizadas entre as moléculas fluídicas e os átomos minerais presentes na matriz do solo. Estas forças então atraem e fixam as moléculas de água no solo e diminuem sua potencialidade com relação a água livre.

De acordo com Soto et al. (2009), o fluxo não saturado é influenciado principalmente pelo potencial matricial de fluxo e este por sua vez é influenciado pela carga de pressão exercida pelo solo. Esta carga de pressão também pode ser entendida como sucção ou sorção quando a sucção do solo aumenta a condutividade hidráulica diminui exponencialmente. A partir de Gardner (1958), que linearizou a equação inicial proposta por Richards (1931), encontrou-se uma equação exponencial empírica, utilizada por Reynolds e Erick (1985) para determinar a função condutividade hidráulica não saturada, sendo expressa como:

$$K(\psi) = K_{fs} \cdot e^{\alpha\psi} \quad \psi < 0; \alpha > 0 \quad \text{Eq. (3)}$$

Onde:

- K_{fs} = condutividade hidráulica saturada medida *in situ* (m/s);
- $e = 2,71828$;
- ψ = corresponde à sucção do solo (kPa);
- α = constante;

3.3 PERMEABILIDADE SATURADA

“A permeabilidade é a propriedade que o solo apresenta de permitir o escoamento da água através dele, sendo o seu grau de permeabilidade expresso numericamente pelo “coeficiente de permeabilidade.” (CAPUTO, 1996).

Este coeficiente é obtido através da aplicação da Lei de Darcy, que expressa à velocidade de percolação sendo diretamente proporcional ao gradiente hidráulico do solo. A obtenção deste coeficiente faz-se necessária para a solução de diversos problemas práticos encontrados na engenharia, tais como: drenagem, recalques, etc. (CAPUTO, 1996).

$$Q = k \cdot i \cdot A = Kfs \cdot \frac{\Delta H}{L} \cdot A \quad \text{Eq. (4)}$$

Onde:

- Q = vazão (m^3/s)
- Kfs = condutividade hidráulica (m/s)
- i = gradiente hidráulico = $\Delta H/L$
- ΔH = perda de carga do fluxo (m)
- L = comprimento da amostra (m)
- A = área da amostra perpendicular ao fluxo (m^2)

Existem certos fatores que irão influenciar de maneira direta na permeabilidade do solo, dentre eles se enquadram os valores de quantidade, continuidade, tamanho dos poros de maneira que a compactação e a descontinuidade dos poros são os principais responsáveis pela redução significativa da permeabilidade do solo à água (BEUTLER et al., 2001).

3.4 MÉTODOS PARA LEVANTAMENTO DA CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA

Segundo Lisboa (2006), há métodos de campo diferentes para se medir a condutividade hidráulica dos solos. Dentre deles destacam-se os ensaios de poços e furos, o método de Hvorslev, o infiltrômetro de anel duplo, a câmara de fluxo e o perfil instantâneo. O método de poços e furos é o mais utilizado no ramo da engenharia e utiliza como equipamentos para execução os permeâmetros.

3.4.1 Permeâmetro de Guelph

Há na literatura diversos métodos disponíveis para efetuação do cálculo da condutividade hidráulica do solo, porém, a escolha do procedimento adequado irá variar de acordo com as características do solo e as condições do local a ser estudado. O método do permeâmetro Guelph possui maior aceitação por apresentar fácil aplicabilidade e manuseio, baixo índice de perturbação no solo, ter maior exatidão dos resultados e, portanto, precisão no cálculo da condutividade hidráulica (SOTO et al., 2009).

Segundo Lisboa (2006), o equipamento fora desenvolvido por Reynolds et al. (1983) para determinar *in situ* a condutividade hidráulica saturada de campo (K_{fs} - hydraulic conductivity at field saturation) e, posteriormente aperfeiçoada por Reynolds e Elrick (1985), na University of Guelph, Canadá, levando em conta os efeitos do fluxo não saturado. Como consequência do novo modelo teórico, foram também obtidos outros parâmetros adicionais, tais como, o potencial matricial de fluxo e sorção.

Este método é utilizado para medir a permeabilidade do solo através de um permeâmetro de furo de carga hidráulica constante que medirá a condutividade hidráulica saturada de campo acima do lençol freático. Após um determinado tempo, que será influenciado por diferentes outros fatores, uma pequena área em torno do furo estará saturada (figura 2) e, portanto o fluxo do líquido escolhido como percolante tornar-se-á constante (AGUIAR, 2001).

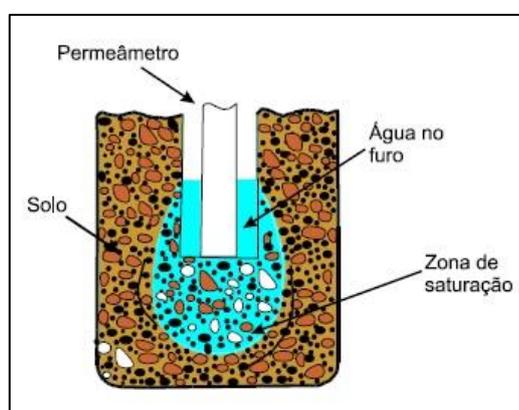


Figura 2 - Bulbo saturado.
Fonte: (SANTOS, 2005).

Este valor de fluxo é utilizado no cálculo da permeabilidade do solo. O valor encontrado é referente ao valor de saturação de campo, pois é praticamente impossível atingir o grau de saturação total, uma vez que não há como preencher todos os espaços vazios em uma situação de campo (AGUIAR, 2001).

O funcionamento consiste em uma carga constante que trabalha sob o princípio do tubo de Mariotte, e permite determinar entre outras propriedades, a condutividade hidráulica saturada, levando em consideração o efeito do fluxo não saturado (AGUIAR, 2001).

A determinação da condutividade hidráulica é comumente realizada segundo procedimentos de ensaio e cálculos denominados como sendo de um estágio, mantendo uma altura constante de água no furo de sondagem, e denominado como de dois estágios, quando uma segunda e maior altura de água é aplicada após a conclusão do primeiro estágio, porém diversas pesquisas atestam que os valores encontrados pelo método de dois estágios podem ser negativos, tanto para a condutividade quanto para o potencial matricial de fluxo. Alega-se que a heterogeneidade ou macroporosidade de um determinado tipo de solo podem influenciar nas medições entre um e outro estágio de medições, uma vez que camadas com características diferenciadas quanto à compactação, textura, umidade, presença de raízes e de formigueiros alterarão os resultados (SOTO et al., 2009).

3.5 MICROCONTROLADORES

Segundo Martins (2005), o surgimento dos microcontroladores ocorreu por volta da década de 70, quando a Intel, resolveu desenvolver um componente que integrava em uma única unidade toda a arquitetura utilizada até então em seus computadores.

Atualmente, na maioria dos equipamentos eletrônicos, estão presentes os microcontroladores. Desde complexos sistemas de automação residencial à simples rádios, detecta-se a aplicação destes componentes eletrônicos, contribuindo na

diminuição do seu custo, por ser capaz de substituir um grande número de outros componentes.

Alguns autores consideram um microcontrolador como um computador de um único chip construído para realizar tarefas de controle, como controlar um motor ou enviar um dado para uma porta serial.

Segundo Dernadin, (2008), a programação usada nos microcontroladores é mais fácil porque o acesso aos periféricos externos ao chip é feito por uma forma padronizada e integrada na linguagem de programação.

Os microcontroladores permitem o desenvolvimento de novos projetos de hardware e software, automatizando equipamentos eletrônicos, melhorando seu desempenho e sua acurácia. Ainda, a utilização desses componentes facilita na concepção de novos softwares e hardware mesmo para iniciantes, pois, além da facilidade na montagem e na programação, ainda possui licença *Creative Commons* que permitem a cópia e compartilhamento com menos restrições que o tradicional “todos direitos reservados”. [Um exemplo deste tipo de dispositivo e plataforma de prototipagem de hardware eletrônica é o Arduino].

3.6 ARDUINO

O Arduino foi desenvolvido em 2005, na Itália, com intuito a prototipação. Desde sua criação o Arduino já vendeu mais de 150.000 placas oficiais e estima-se que o número de placa-clones (não oficiais) vendidas, seja por volta de 500 mil em todo mundo (MCROBERTS, 2011).

De acordo com a página oficial do Arduino (2016), a versão UNO possui 14 pinos digitais de entrada/saída - dos quais seis podem ser destinados como saídas PWM (Modulação por Largura de Pulso) -, seis são entradas analógicas, uma cristal oscilador de 16 MHz, uma conexão USB, uma tomada de força, um cabeçalho ICSP(In Circuit System Programming) e um botão de reset.

A escolha pelo uso da plataforma Arduino está baseada em diversos fatores, conforme Moreira (2013):

1. Facilidade na utilização: permitindo que profissionais de várias áreas realizem inovações utilizando a plataforma;
2. Custo benefício: baixo custo em relação à plataformas de prototipagem de hardware eletrônica similares;
3. Multiplataforma: é um ambiente que pode ser executado nos sistemas operacionais Microsoft Windows, Apple Macintosh e GNU/Linux.
4. IDE de programação Processing: considerado um ambiente de desenvolvimento fácil de ser utilizado;
5. Hardware e Software são de fonte abertos: o diagrama do circuito está disponível para download;
6. Bibliotecas de desenvolvimento: estão disponíveis para download bibliotecas que permitem a interface com outros dispositivos;

A plataforma Arduino tem sido empregada no desenvolvimento de vários protótipos, dentre eles pode-se citar Moreira et al. (2013) que utilizaram a plataforma Arduino customizada para realizar sondagens atmosféricas. Foram desenvolvidos dois protótipos em especial, uma microestação e um *data-logger* usando o Arduino. Os autores concluíram que o sistema construído a partir da plataforma Arduino é robusto e confiável para realizar as medidas das variáveis ambientais.

4 MATERIAL E MÉTODOS

A pesquisa foi desenvolvida nas dependências da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), campus Medianeira, mais especificamente nos laboratórios de solos e de desenvolvimento de hardware.

A primeira etapa do projeto consistiu no estudo e avaliação dos possíveis materiais a serem utilizados para construção do equipamento, levando em conta a facilidade de encontrá-los, custo de aquisição e qualidade. Decidiu-se por adquirir materiais de baixo custo, porém de alta qualidade, podendo ser adquiridos em qualquer loja de material de construção e de eletrônica também, pois tratam-se basicamente de tubos e conexões além dos componentes necessários para elaboração da estrutura de medição automatizada.

Após a compra dos materiais o equipamento começou a ser construído baseado em um modelo desenvolvido pela equipe do departamento de solos da Universidade Estadual de Londrina (figura 3), o qual gerou a concepção exposta pela figura 4.



Figura 3 - Modelo base.

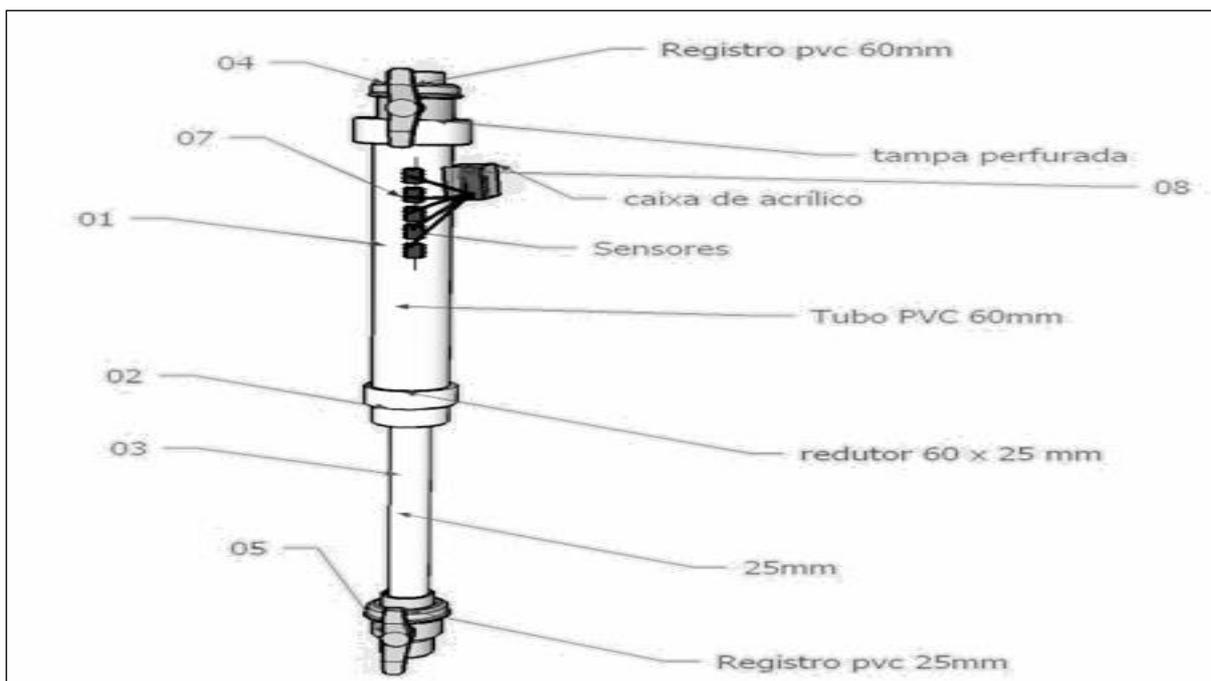


Figura 4 - Desenho de projeto do permeâmetro.

4.1 MATERIAIS

O custo total dos equipamentos necessários para a montagem desde o seu início até a conclusão do protótipo reduziu em quase 50 vezes o valor de mercado do permeâmetro comercial.

Os materiais necessários consistem em um tubo de PVC, comum, para água de 60 mm de diâmetro e 1 metro de comprimento; outro tubo de PVC de 25 mm de diâmetro e 1 m de comprimento; uma redução; dois registros de gaveta de PVC, com os diâmetros de 60 e 25 mm respectivamente; um suporte de ferro com três apoios soldados para o acoplamento de 3 parafusos sem cabeça de 30 cm, aproximadamente; uma placa hardware Arduino MEGA; 16 multiplexadores cd 4067; um relógio em tempo real; e um dispositivo Bluetooth . Os elementos utilizados para a construção estão dispostos a seguir (figura 5):



Figura 5-a - Tubo de PVC 60 mm e 25 mm, ambos com 1 metro de comprimento.



Figura 5-b - Redução de PVC.



Figura 5-c - Registro de gaveta.



Figura 5-d - Tripé.



Figura 5-e - Placa Arduino MEGA.



Figura 5-f - Multiplexador (cd 4067).



Figura 5-g - Flat cable.



Figura 5-h - Agulhas número 8.

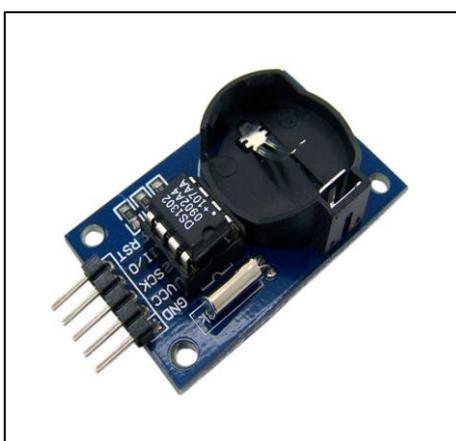


Figura 5-i - Relógio em tempo real.

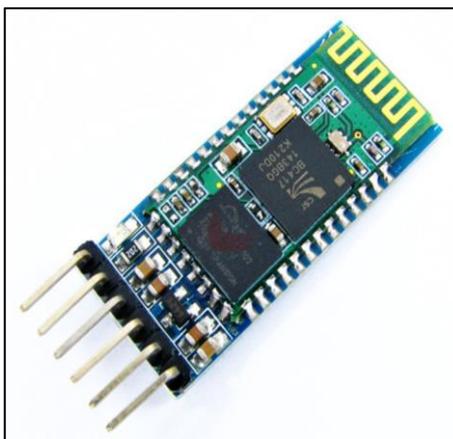


Figura 5-j - Dispositivo Bluetooth.

4.2 CONSTRUÇÃO

Através da utilização de lixa e cola, o tubo de PVC de 60 mm de diâmetro e 1000 mm de comprimento, foi acoplado a uma redução e a outro tubo de PVC de 25 mm de diâmetro e 1000 mm de comprimento. Foram unidas em suas extremidades, superior e inferior, dois registros de gaveta de PVC, com os diâmetros de 60 e 25 mm respectivamente com a função de controlar a entrada de água no reservatório e a saída de água para o solo.

A construção do tripé foi terceirizada e cada um dos parafusos da peça final pode ser removido de acordo com a necessidade do operador do equipamento, de modo a facilitar o ajuste da altura de uso do aparelho.

Depois de efetuada a construção do permeâmetro, iniciou-se o processo de fabricação da ferramenta computacional responsável por efetuar a leitura dinâmica do nível d'água dentro do reservatório. Para isto, a tubulação de 60 mm foi perfurada 250 vezes, utilizando uma fresadora roteadora (CNC) do laboratório de Hardware da UTFPR com espaçamento de 2 mm entre cada furo e com uma broca de 1 mm de espessura, cobrindo um comprimento de 500 mm.



Figura 6 - Tubo perfurado pela CNC.

Nesta tubulação, reservatório principal do equipamento, foram acopladas 250 agulhas metálicas de costura, número 8 (figura 5-h), que foram soldadas uma a uma aos fios responsáveis por fazerem a comunicação entre o barramento e os chips

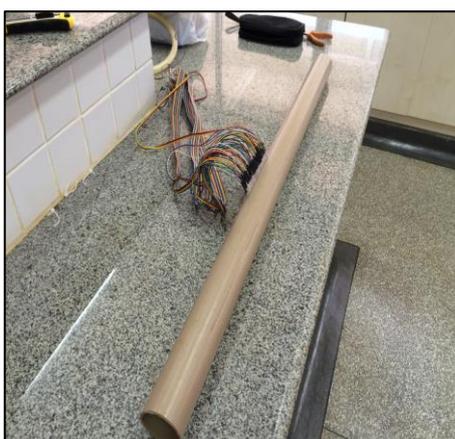


Figura 7 - Instalação das sondas.

Os flat cables foram soldados aos 16 multiplexadores (cd 4067), que foram organizados e instalados em 4 suportes. Cada um dos multiplexadores têm capacidade para efetuar apenas 16 entradas de informação (figura 8), portanto, foi necessário a utilização de 16 microprocessadores deste modelo para suprir a demanda de 250 pontos de leitura. As agulhas tiveram de ser colocados de forma sequencial ao longo do barramento, de modo que o código escrito não sofresse influência de erros externos, podendo funcionar de maneira livre. Quando concluído o barramento e as ligações, as placas e o Arduino foram alocados em uma caixa

isolante fabricada na própria universidade com materiais doados pelo próprio laboratório de Hardware e presas ao tubo (figura 9).

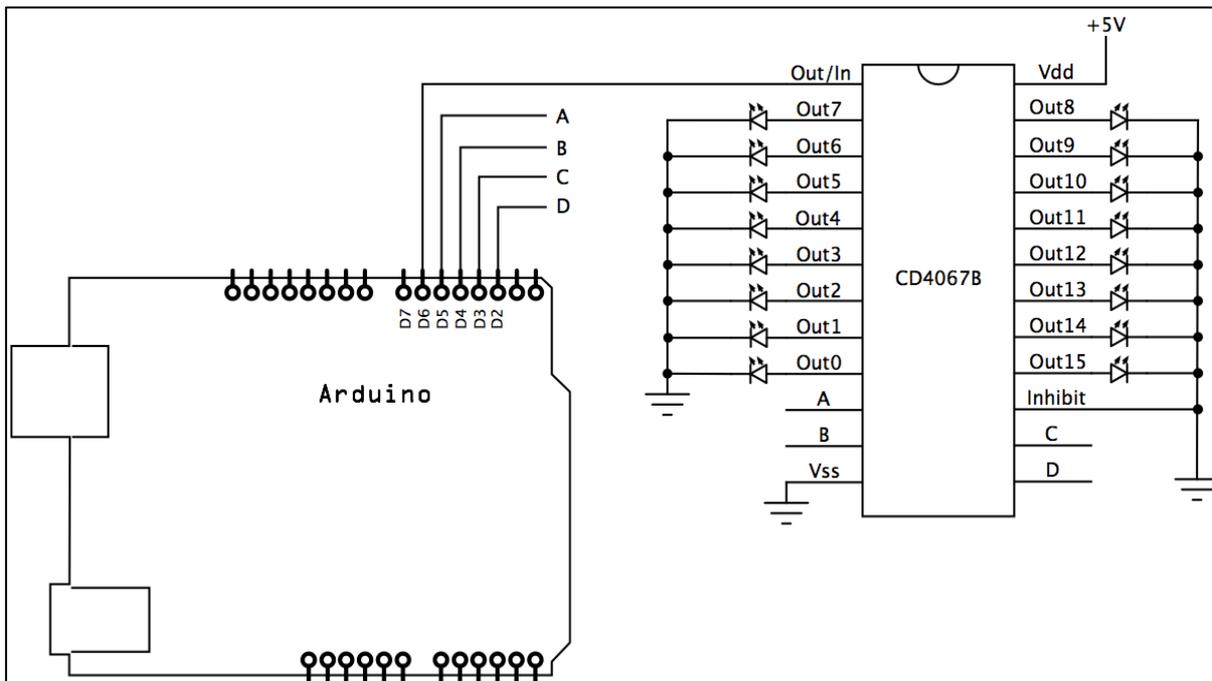


Figura 8 - Gabarito do multiplexador.

Fonte: Imagens Google



Figura 9 - Placa com os multiplexadores dentro da caixa de proteção.

O hardware foi instalado juntamente ao restante dos equipamentos, bem como um módulo de relógio em tempo real para Arduino, com o objetivo de marcar o tempo entre a leitura de um sensor e o próximo, um dispositivo Bluetooth e baterias usadas utilizadas como fonte de energia para o funcionamento independente do equipamento, gerando autonomia de algumas horas.

4.3 MÉTODO APLICADO

O método utilizado para fazer o teste de funcionamento e aferir melhor os resultados obtidos através das amostragens fora o método de um único estágio para solos saturados. Segundo Elrick et al. (1989), na intenção de evitar possíveis erros de cálculo, o emprego do método de um estágio seria mais adequado em meios heterogêneos, a partir da estimativa inicial da sorção, uma vez que estes valores podem ser encontrados na literatura de acordo com o tipo de solo que está se trabalhando e tal fator não influencia significativamente na obtenção de parâmetros como o potencial matricial de fluxo e a condutividade hidráulica.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Baseado no modelo e no desenho inicial do projeto, o resultado obtido observado foi extremamente semelhante ao esperado, como pode ser visualizado:



Figura10 - Protótipo finalizado.

Na sequência realizaram-se dez testes para verificar o funcionamento do sistema de leitura dinâmica, pois diferentemente de alguns exemplares de permeâmetros, este não possui uma graduação para verificar a altura da coluna d'água e, portanto, o funcionamento do dispositivo tornar-se primordial.

A leitura foi feita através da variação da condutividade elétrica entre as agulhas, sendo possível, a partir disso, determinar a presença ou a ausência de água, para tanto, a água recebeu uma solução salina diluída, com baixa concentração, ou seja, esse dispositivo foi instalado para realizar o controle do volume de água infiltrada, em função do tempo, através da leitura da variação do nível de água (ΔH) no tubo do reservatório de água.

Estes testes foram realizados com o objetivo de avaliar se os sensores desenvolvidos seriam capazes de identificar a presença de água no interior do vaso

de Mariotte, e registrar a diferença de tempo entre a leitura de um sensor, a próxima leitura. A partir deste registro resultou na variável C que é a leitura constante obtida no equipamento. A partir dessa constante e da variável ΔT , intervalo de tempo observado até a leitura ficar constante, é possível calcular a razão da vazão (R), através da equação:

$$R = \frac{C}{\Delta T} \quad \text{Eq. (5)}$$

Onde:

- R = razão da vazão (m/s);
- C = variável (m);
- ΔT = intervalo de tempo (s);

Na sequência, calculou-se a vazão do regime permanente, utilizando o valor da razão R e da área (A) do reservatório utilizado no equipamento (28,27 cm²), através da equação:

$$Q = R \cdot A \quad \text{Eq. (6)}$$

Onde:

- Q = vazão (m³/s);
- R = razão da vazão (m/s)
- A = área da seção transversal (m²);

Em seguida a vazão foi aplicada na equação (1) e o valor da condutividade hidráulica foi encontrado. A partir deste valor de Kfs em função da vazão de escoamento, conseguiremos aferir o valor da permeabilidade de determinado tipo de solo.

5.1 TESTES DE VERIFICAÇÃO

Foram feitos 10 testes para verificar o funcionamento do equipamento em busca de obter-se um resultado confiável para comparar com outros equipamentos semelhantes já testados e calibrados, de maneira que o protótipo criado atinja o objetivo de funcionalidade e eficiência desejadas.

O resultado dos testes efetuados estão dispostos na tabela a seguir em que foi analisado o tempo necessário para o nível d'água baixar 2 mm sem a presença de material sólido na saída do permeâmetro e o tempo necessário para esta descarga atingir o mesmo nível quando submetida a infiltração em solo argiloso.

Tabela 3 – Apresentação dos resultados de registro de tempo de leitura entre cada agulha no vaso de Mariotte.

Teste	Tempo médio livre. (μ s)	Tempo médio em solo argiloso (s)
1	2	10
2	3	12
3	2	11
4	2	12
5	3	12
6	3	10
7	3	10
8	3	10
9	3	10
10	3	11

Na coluna 2 da tabela, os tempos ficaram entre 2 e 3 (μ s), pois a água foi simplesmente despejada de dentro do tubo, com o intuito de observar se o dispositivo eletrônico seria capaz de registrar tempos muito pequenos, situação que comumente ocorre em solos arenosos, que apresentam uma condutividade hidráulica maior em relação aos outros tipos de solo.

Na coluna 3 estão apresentados os tempos médios, quando o registro foi aberto, dentro de um recipiente com solo argiloso, simulando um procedimento em

campo. Os tempos obtidos, quando comparados com dados levantados por um permeâmetro de Guelph comercial, são extremamente coerentes e adequados com resultados dos mesmos.

Os dados levantados utilizando-se um permeâmetro de Guelph comercial para o mesmo tipo de solo e a relação entre o tempo demandado para estabilização da vazão da carga (tabela 4), serviram de comparativo em relação aos resultados obtidos utilizando o protótipo.

Tabela 4 - Ensaio realizado utilizando um permeâmetro de Guelph.

Amostra	Tempo (acumulado)	Tempo (s)	Régua Leitura (cm)	Régua Diferença (cm)
Ensaio 1	1	60	22,5	0
Ensaio 1	2	60	23,7	1,2
Ensaio 1	3	60	25,1	1,4
Ensaio 1	4	60	27	1,9
Ensaio 1	5	60	28,2	1,2
Ensaio 1	6	60	29,5	1,3
Ensaio 1	7	60	30,8	1,3
Ensaio 1	8	60	32	1,2
Ensaio 1	9	60	33,3	1,3
Ensaio 1	10	60	34,6	1,3
Ensaio 1	11	60	35,8	1,2
Ensaio 1	12	60	37	1,2
Ensaio 1	13	60	38,2	1,2
Ensaio 1	14	60	39,4	1,2
Ensaio 1	15	60	40,6	1,2

Analisando o quadro, vemos que em um tempo de 60 segundos (coluna 3), a coluna de água no tubo do permeâmetro variou em média 12 mm, resultado análogo aos obtidos utilizando o dispositivo eletrônico demonstrados pela tabela 3.

6 CONCLUSÃO

Quando se trata sobre adquirir equipamentos a serem utilizados na construção acadêmica de estudantes universitários, sabemos que existem muitos empecilhos que dificultam o trâmite, desde a requisição de compra até o atendimento da mesma por parte da instituição de ensino, ainda mais quando os equipamentos requisitados possuem um valor de mercado extremamente elevado.

Este projeto demonstrou que outras alternativas podem ser executadas para que estas necessidade sejam supridas e o fator ensino não fique deficiente por conta de déficit orçamentário.

O equipamento desenvolvido possui baixo custo e traz resultados análogos aos resultados obtidos com permeâmetros de Guelph comerciais além de possuir o adicional tecnológico, que fora implementado pela primeira vez, buscando facilitar os métodos de observação e captação de dados diminuindo os erros ocasionais gerados pelo operacional humano.

Desta forma conclui-se que o trabalho atingiu os seus objetivos e o aparelho desenvolvido será de extrema valia no uso e atribuições dos discentes da UTFPR e de outras instituições de ensino durante aplicações em aulas ao longo dos cursos, além de proporcionar possível retorno financeiro aos desenvolvedores. Buscando encontrar fundos de investimento para que a inovação possa ser inserida no mercado e atender a demanda de engenheiros ambientais, florestais, agrícolas e diversos.

REFERÊNCIAS

AGUIAR, A. B. de. **O emprego do Permeâmetro de Guelph na determinação da permeabilidade do solo de camadas de lixo e sua cobertura.** 2001. 67 f.

BEUTLER, A. N.; SILVA, N. L. N.; CURI, N.; FERREIRA, M. M.; CRUZ, J. N.; PEREIRA Filho, I. A. **Resistência a penetração e permeabilidade de Latossolo Vermelho Distrófico típico sob sistemas de manejo na região dos cerrados.** Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.25, n.1 p.167-177, 2001.

CABRAL, J. **Movimento das Águas Subterrâneas.** Fortaleza, 2000. p. 35-51.

CAPUTO, Homero. **Mecânica dos solos e suas aplicações.** v. 1, 6ª ed. Rio de Janeiro, 1996.

CASTRO, O. M. **Comportamento físico e químico de um latossolo roxo em função do seu preparo na cultura do milho (Zea Mays L.).** Tese de doutorado – ESALQ/USP. Piracicaba, 1995. 174 p.

CELLIGOI, A. **Hidrogeologia da Formação Caiuá no Estado do Paraná.** Tese de doutorado em Hidrogeologia – IG/USP. São Paulo, 2000.

DORAN, J.W. & PARKIN, T.B. **Defining and assessing soil quality.** In: DORAN, J.W.; COLEMAN, D.C.; BEZDICEK, D.F. & STEWART, B.A., eds. **Defining soil quality for a sustainable environment.** Madison, SSSA, 1994. p.1-20.

ELRICK, D. E.; REYNOLDS, W. D.; TAN, K. A. **Hydraulic conductivity measurements in the unsaturated zone using improved well analysis.** Groundwater Monitoring Review. v.9, 1989. p.184- 193.

LEVIEN, R.; JONG VAN LIER, Q. & ALVES, A.G.C. **Influence of surface crust on water infiltration rates measured by a rotating-boom rainfall simulator and a double-cylinder device.** R. Bras. Ci. Solo, 24:479-486, 2000.

LISBOA, RAFAEL L. L. **Determinação da condutividade hidráulica não saturada de solos residuais com permeâmetro Guelph e ensaios de laboratório.** Tese de mestrado, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2006.

MARTINS, N. A. **Sistemas Microcontrolados.** 1º ed. Novatec. 2005

MELLO, V. F. B; TEIXEIRA, A. H. **Mecânica de solos.** São Carlos: Escola de Engenharia, 1967.

MCROBERTS, M. **Arduino básico.** São Paulo, SP. Ed. 1, p. 456, 2011.

MOREIRA, A.; PORTELA, A.; SILVA, R. **Uso da plataforma Arduino no desenvolvimento de soluções tecnológicas para pesquisas de dados atmosféricos na Amazônia.** Revista Perspectiva Amazônica Ano 3 N° 5 p.119-126.

PINTO, J. S. **Estudo da condutividade hidráulica de solos para disposição de resíduos sólidos na região de Santa Maria.** 2005. 154 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.

REYNOLDS, W. D.; ELRICK, D. E. **In situ measurement of field saturated hydraulic conductivity, sorptivity and the α -parameter using the Guelph permeameter.** Soil Science, v.140, n° 4, 1985. p. 292–302.

REYNOLDS, W. D.; ELRICK, D. E.; TOPP, G. C. **A reexamination of the constant head well permeameter method for measuring saturated hydraulic conductivity above the water table.** Soil Science, v.136, 1983. p.250–268.

SANTOS, M. **Avaliação hidrogeológica para determinação da vulnerabilidade natural do aquífero freático em área selecionada na cidade de Londrina (PR).**

Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade do Estado de São Paulo, Rio Claro, 2005.

SOBRINHO, T. A. **Desenvolvimento de um infiltrômetro de aspersão portátil.**

Viçosa, MG:UFV, 1997, 85 p.

SOTO, M.; CHANG, K.; VILAR, O. **Análise do método do permeâmetro guelph na determinação da condutividade hidráulica saturada.** Águas Subterrâneas, v.23, n.01, p.137-152, 2009.

TERZAGHI, K., AND PECK, R.B. **Soil Mechanics in Engineering Practice.** Second Edition: John Wiley & Sons, New York, 1967, 729 p.

TOOLY, M. **Circuitos Eletrônicos.** 3° ed. Rio de Janeiro, 2007

ZHANG, F. Z.; GROENEVELT, P. H.; PARKIN, G. W. **The well-shape factor for the measurement of soil hydraulic properties using the Guelph Permeameter.** Soil and Tillage Research, v.49, p.219-221, 1998.

A CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA DE UM SOLO ARENOSO DETERMINADA A PARTIR DE ENSAIOS DE CAMPO DE LABORATÓRIO. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/>> Acesso em 10/02/2016.

ÁGUA NO SOLO: CARACTERÍSTICAS E COMPORTAMENTO. Disponível em: <http://disciplinas.stoa.usp.br/pluginfile.php/270126/mod_resource/content/1/Apostila%20Cap.%202%2020%C3%81gua%20no%20Solo%20Caracter%C3%ADsticas%20e%20Comportamento.pdf>. Acesso em: 15/05/2016.

ARDUINO 2016. Disponível em: <<http://arduino.cc/>>. Acesso em 06/06/2016.

DERNADIN, G. W. Disponível em: <<http://pessoal.utfpr.edu.br/gustavo/>>. Acesso em 20/03/2015.

IMAGENS GOOGLE. Disponível em: <<http://www.tigoe.net/pcomp/code/wp-content/uploads/2009/05/cd4067.png>>. Acesso em: 27/05/2016.