

DESENVOLVIMENTO DE EQUIPAMENTO AUTOMATIZADO PARA MEDIDAS DE PERMEABILIDADE SATURADA DO SOLO EM CAMPO

**FABIANA C. A. SCHÜTZ¹, MARIVONE FANCK,² ROMERO S. DE BRITTO³
MÁRCIO J. ARAÚJO⁴**

¹ Professora da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira, fabianaschutz@utfpr.edu.br

² Professora da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira, marizabella@gmail.com

³ Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Computacionais para o Agronegócio, romero.rsb@hotmail.com

⁴ Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Computacionais para o Agronegócio, marciomjapr@gmail.com

Apresentado no

XLIX Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola - CONBEA 2020

23 a 25 de novembro de 2020 - Congresso On-line

RESUMO: Este trabalho objetivou desenvolver um equipamento automatizado para medidas de permeabilidade saturada do solo em campo, de baixo custo, com leitura do nível de carga automatizada pelo método de estágio único para solos saturados. Os dados coletados são enviados por bluetooth para um aplicativo desenvolvido para retornar os valores de condutividade hidráulica *in loco*. Constatou-se a eficiência do equipamento em intervalos de tempo extremamente curtos. Os valores de condutividade hidráulica encontrados foram validados por 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. Foi solicitado o depósito de pedido de patente de invenção junto ao INPI, sob o número de protocolo BR 10 2016 007861, em 2016.

PALAVRAS-CHAVE: Condutividade hidráulica. Permeâmetro. Automação

DEVELOPMENT OF AUTOMATED EQUIPMENT FOR SOIL HYDRAULIC PERMEABILITY MEASURES

ABSTRACT: This research aimed to develop an automated equipment for measurements of soil saturated permeability in the field, at low cost, with automatic load level reading by the single stage method for saturated soils. The collected data is sent via bluetooth to an application developed to return the hydraulic conductivity values *in loco*. The efficiency of the equipment was verified in extremely short intervals. The hydraulic conductivity values found were validated by a commercial permeameter of the same type. Thus, the project achieved the goals initially proposed, exceeding expectations in terms of operation, acquisition cost and ease of execution. The patent application was filed with the INPI, under protocol number BR 10 2016 007861, in 2016.

KEYWORDS: Hydraulic conductivity. Permeameter. Automation

INTRODUÇÃO: A permeabilidade do solo é um atributo físico de grande importância para a engenharia, o estudo da percolação de água no solo, ou seja, da permeabilidade, é importante porque intervêm num grande número de problemas práticos, tais como drenagem, rebaixamento do nível d'água, cálculo de vazões, análise de recalques, estudo de estabilidade, entre outros. Segundo Sampaio (2005), vários são os atributos físicos do solo que influenciam nos valores do seu coeficiente de permeabilidade, sendo considerados de maior importância a densidade e a porosidade. O atributo físico do solo que melhor se correlaciona com os valores dos

coeficientes de permeabilidade é a macroporosidade.

Existem diversos métodos de determinação dos valores da VIB e vários pesquisadores avaliaram e compararam os métodos existentes, principalmente utilizando, permeômetros, infiltrômetros de aspersão ou simuladores de chuva e infiltrômetro de anéis concêntricos (LEVIEN et al. 2000). Dentre estas metodologias, o permeômetro 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). Segundo Pinto (2005), o Permeômetro 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. Neste contexto, o presente trabalho objetivou projetar e construir um equipamento baseado no modelo do Permeômetro de Guelph com a utilização de sensores para leitura dinâmica da condutividade hidráulica no solo.

MATERIAL E MÉTODOS:

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, o qual gerou a concepção exposta pela figura 1A.

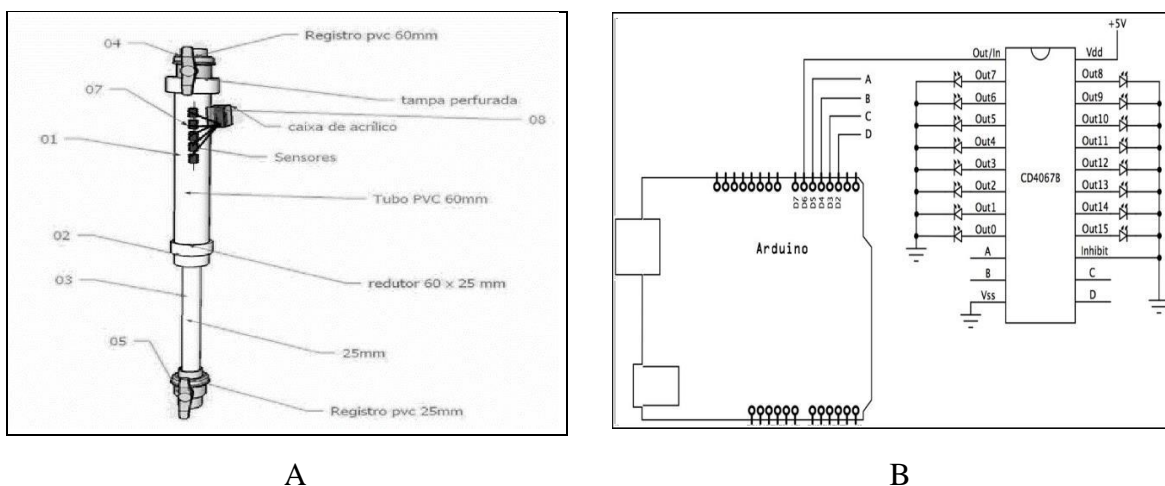
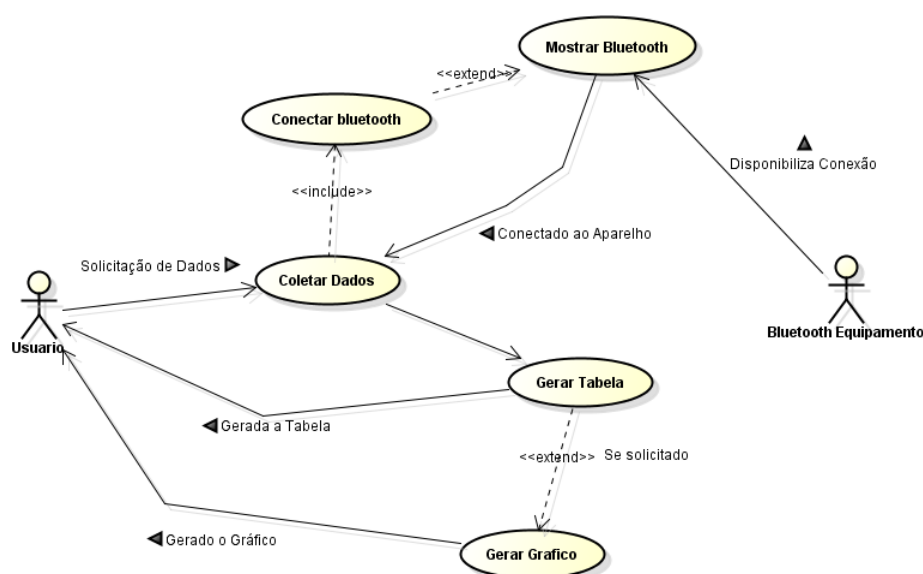


Figura 1 A e B - Projeto do equipamento automatizado para medidas de permeabilidade hidráulica do solo e Gabarito do multiplexador, respectivamente. Fonte autoria própria.

Na sequência, 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. Nesta tubulação,

reservatório principal do equipamento, foram acopladas 250 agulhas metálicas de costura, número 8, que foram soldadas uma a uma aos fios responsáveis por fazerem a comunicação entre o barramento e os chips. 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, 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 do laboratório de Hardware e presas ao tubo. 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 utilizadas como fonte de energia para o funcionamento independente do equipamento, gerando autonomia de algumas horas.

Na sequência, foi desenvolvido um aplicativo para dispositivos móveis, com o objetivo de receber as informações enviadas via Bluetooth® e processar a informação. Na figura 02 é possível observar o diagrama de casos de uso.



UC - 01	Coletar dados
UC - 02	Conectar Bluetooth
UC - 03	Mostrar Bluetooth
UC - 04	Gerar Tabela
UC - 05	Gerar Gráfico

Figura 2– Diagrama de casos de uso aplicativo para dispositivos móveis, com o objetivo de receber as informações enviadas via Bluetooth®.

RESULTADOS E DISCUSSÃO:

O protótipo inicial foi desenvolvido a partir do modelo inicial, com o principal objetivo de verificar se a metodologia proposta para a leitura da altura da coluna d'água, com os sensores adaptados com agulhas seria capaz de fazer as leituras. Nas figuras 3 A , B e C pode se observar o processo de montagem do protótipo.



A



B

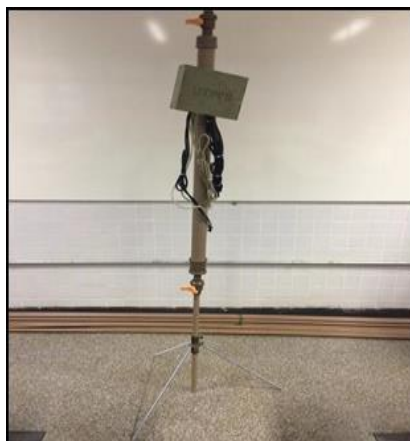
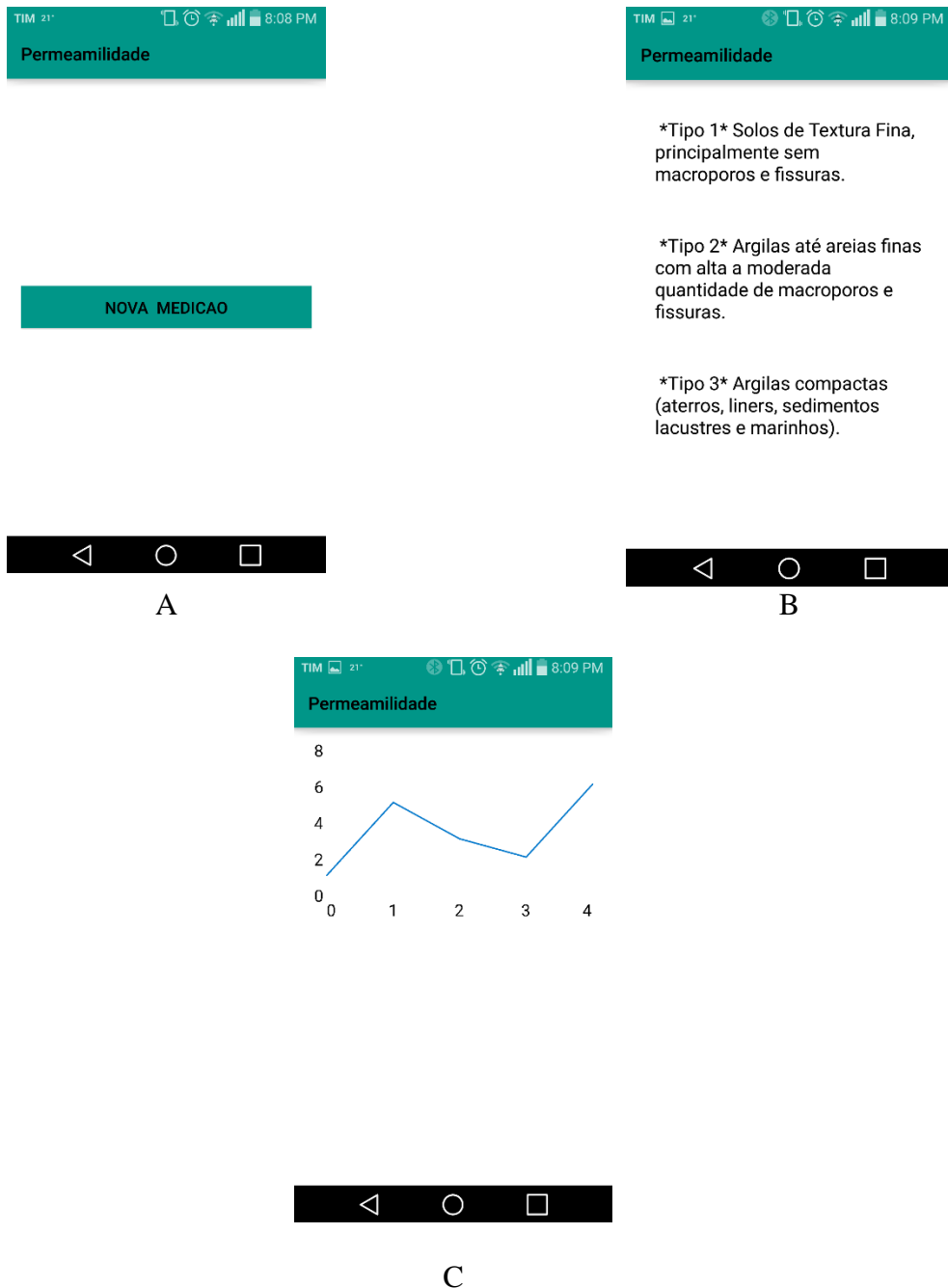


Figura 3 A e B – Início da montagem dos sensores na tubulação e placa com os multiplexadores dentro da caixa de proteção, Protótipo finalizado respectivamente. Fonte autoria própria

Os flat cables foram soldados aos 16 multiplexadores (cd 4067), que foram organizados e instalados em 4 suportes. Cada um dos multiplexadores tem capacidade para efetuar apenas 16 entradas de informação, portanto, foi necessário a utilização de 16 microprocessadores deste modelo para suprir a demanda de 250 pontos de leitura. As agulhas tiveram de ser colocadas 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, conforme a figura 3C. Os resultados das repetições dos testes para verificar o funcionamento do sistema de leitura dinâmica, foram confiáveis ao se comparar com outro equipamento, comercial, semelhante já testado e calibrado. Para os resultados dos testes efetuados foi analisado o tempo necessário para o nível d'água baixar 2 mm sem a presença de material sólido na saída do equipamento e o tempo necessário para esta descarga atingir o mesmo nível quando submetida a infiltração em solo argiloso. Os tempos registrados para ambos os ensaios, quando o registro foi aberto, dentro de um recipiente com solo argiloso, simulando um procedimento em campo comparados com dados levantados por um permeâmetro de Guelph comercial, demonstraram-se coerentes. 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, serviram de comparativo em relação aos resultados obtidos utilizando o protótipo. O desenvolvimento do aplicativo para dispositivos móveis, responsável por processar as informações de permeabilidade hidráulica do solo, demonstrou resultados satisfatórios, foi desenvolvida a documentação do aplicativo, e desenvolvido a primeira versão da interface.

Nas figuras 4 A, B e C, pode-se observar prints da tela da primeira versão do aplicativo desenvolvido. A primeira versão apresenta uma interface relativamente simples com um botão para iniciar a leitura, após receber os dados que os sensores dentro do reservatório principal do

equipamento. No anexo 1 é possível observar o código do aplicativo



Na figura 4 A, inicia-se o processo, quando o usuário aperta o botão nova medição, recebe as informações por Bluetooth[®] onde são considerados o índice constante de saída da água, o diâmetro do furo e a altura da água no reservatório. Para interpretação dos resultados dos resultados obtidos, o aplicativo segue a mesma metodologia proposta por Reynolds e Elrick (1985), baseada na equação de Richards (1931), onde o raio do fluxo permanente num furo cilíndrico é aproximado por uma equação de vazão (Q).

$$Q = R \cdot A \tag{eq 1}$$

Em que:

Q é a vazão do regime permanente (cm³/s)

A é a área do reservatório de 28,27 cm² por se tratar de um tubo de PVC de 60 mm de diâmetro .

R é a razão constante obtida durante o ensaio.

Para determinar os parâmetros correspondentes a infiltração, utilizou-se o método de carga hidráulica proposta por Elrick et. Al. (1989), em que se aplica uma altura de carga hidráulica (H) constante quando o regime permanente é atingido, então, a vazão (Q) e a condutividade hidráulica saturada (Ks) são determinadas por :

$$Ks = \frac{C.Q}{\left(2\pi H^2 + \pi a^2 . C + \frac{2\pi H}{\alpha}\right)} \quad \text{eq 2}$$

Em que

H é a altura da carga hidráulica em cm

a é o diâmetro do orifício aberto pelo trado no solo em cm

α é a macroporosidade analisada visualmente *in situ*

C é o fator de forma dado pela equação 03.

A macroporosidade é a entrada manual no aplicativo, como pode-se observar na figura 4B. E é baseado na proposta de Richard (1931), conforme a figura 05.

Valores de α sugeridos para tipos de solo	
α . (cm ⁻¹)	TIPO DE SOLO
0,01	Argilas compactadas (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 e moderada quantidade de macroporos e fissuras.
0,36	Areias Grossas inclui solos com macroporos e fissuras.

Figura 05 – valores sugeridos para a macroporosidade α , analisada visualmente *in situ*, baseado na proposta de Richard (1931).

O fator de forma C é dado pela equação 03:

$$C = 4 \cdot \left[\frac{1}{2} \text{sen}H^{-1} \left(\frac{H}{2a} \right) - \sqrt{\left(\frac{a}{H} \right)^2 + \frac{1}{4} + \frac{a}{H}} \right] \quad \text{eq 3}$$

Em que

C é o fator de forma, dependente da relação H/a e do tipo de solo

H é a altura da carga hidráulica em cm

a é o diâmetro do orifício aberto pelo trado no solo em cm

Na figura 4C pode se observar a relação entre condutividade hidráulica saturada por a altura da carga hidráulica em cm.

CONCLUSÕES:

Tanto o equipamento quanto o aplicativo necessitam de aprimoração, e novos testes. Porém, o

equipamento desenvolvido possui baixo custo e traz resultados análogos aos resultados obtidos com permeômetros 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 humanos. Desta forma conclui-se que o trabalho atingiu os seus objetivos.

AGRADECIMENTOS: Agradecemos a UTFPR, CNPQ, e Fundação Araucária por prover recursos para a realização desta pesquisa.

REFERÊNCIAS:

- ARDUINO 2016. Disponível em: <<http://arduino.cc/>>. Acesso em 06/06/2016.
- BEUTLER, A. N.; SILVA, N. L. N.; CURI, N.; FERREIRA, M. M.; CRUZ, J. N.; 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.
- DERNADIN, G. W. Disponível em: <<http://pessoal.utfpr.edu.br/gustavo/>>. Acesso em 20/03/2015.
- 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
- 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.
- <https://www.researchgate.net/publication/> Acesso em 10/02/2016.
- IMAGENS GOOGLE. Disponível em: <<http://www.tigoe.net/pcomp/code/wp-content/uploads/2009/05/cd4067.png>>. Acesso em: 27/05/2016.
- 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.
- 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 permeômetro Guelph e ensaios de laboratório. Tese de mestrado, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2006.
- MARTINS, N. A. Sistemas Microcontrolados. 1º ed. Novatec. 2005
- MCROBERTS, M. Arduino básico. São Paulo, SP. Ed. 1, p. 456, 2011.
- MELLO, V. F. B; TEIXEIRA, A. H. Mecânica de solos. São Carlos: Escola de Engenharia, 1967.
- 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.
- 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.
- 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
- 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.

quality for a sustainable environment. Madison, SSSA, 1994. p.1-20.

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. 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.

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.

Soil Science, v.136, 1983. p.250–268.

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.