

PROJETO E VALIDAÇÃO TEÓRICA DE UM SISTEMA AUTOMATIZADO PARA ANÁLISE DA PERMEABILIDADE E RESPIRAÇÃO DO SOLO

Madson Celestino da Rocha

mcr@discente.ifpe.edu.br

Orientador: Anderson Luiz Souza Moreira

anderson.moreira@recife.ifpe.edu.br

RESUMO

Uma característica física essencial que controla a aeração do solo, a troca de gases entre o solo e a atmosfera e a atividade biológica na rizosfera é a permeabilidade do solo ao ar (K_a). A avaliação precisa dessa característica é fundamental para determinar a qualidade estrutural do solo, identificar problemas de compactação e aprimorar as práticas de manejo agrícola. Contudo, os métodos convencionais de medir a permeabilidade ao ar em campo costumam ser complexos, dispendiosos e trabalhosos. Este estudo descreve o projeto, a validação teórica e a proposta de utilização de um infiltriômetro pneumático automatizado de baixo custo, concebido para analisar a permeabilidade do solo ao ar em várias situações de alteração estrutural e umidade inicial. O objetivo principal foi propor e detalhar um aparelho capaz de injetar um fluxo de ar controlado na superfície do solo e, com base na medição da pressão resultante, estimar a permeabilidade ao ar. A abordagem proposta baseia-se em um protótipo utilizando o microcontrolador ESP32, um sensor de pressão diferencial MPXV7002DP para a análise da permeabilidade, e um sensor de gás carbônico (CO_2) MH-Z19 para estudos de respiração do solo. Para a futura validação do protótipo, propõe-se a análise do impacto da perturbação estrutural e da umidade na permeabilidade, bem como a quantificação do efluxo de CO_2 . A análise teórica indica que a compactação e a umidade reduzem significativamente a K_a . Conclui-se que o projeto é uma plataforma multifuncional eficaz e inovadora para a pesquisa em física e biogeoquímica do solo, oferecendo um método rápido e econômico para avaliar a estrutura e a atividade biológica do solo *in situ*.

Palavras-chave: permeabilidade ao ar; estrutura do solo; infiltrômetro automatizado; fluxo de gás no solo; compactação do solo; ESP32; sensor de pressão.

ABSTRACT

An essential physical characteristic that controls soil aeration, gas exchange between the soil and the atmosphere, and biological activity in the rhizosphere is soil air permeability (K_a). The precise assessment of this characteristic is fundamental to determine the structural quality of the soil, identify compaction problems, and improve agricultural management practices. However, conventional methods for measuring air permeability in the field are often complex, expensive, and laborious. This study describes the design, theoretical validation, and proposed use of a low-cost, automated pneumatic infiltrometer, conceived to analyze soil air permeability in various situations of structural alteration and initial moisture. The main objective was to propose and detail a device capable of injecting a controlled airflow onto the soil surface and, based on the measurement of the resulting pressure, estimate air permeability. The proposed approach is based on a prototype using the ESP32 microcontroller, a MPXV7002DP differential pressure sensor for permeability analysis, and a carbon dioxide (CO_2) MH-Z19 sensor for soil respiration studies. For the future validation of the prototype, an analysis of the impact of structural disturbance and moisture on permeability is proposed, as well as the quantification of CO_2 efflux. The theoretical analysis indicates that compaction and moisture significantly reduce K_a . It is concluded that the project is an effective and innovative multifunctional platform for research in soil physics and biogeochemistry, offering a rapid and economical method to evaluate the structure and biological activity of the soil in situ.

Keywords: air permeability; soil structure; automated infiltrometer; soil gas flux; soil compaction; ESP32; pressure sensor.

1 INTRODUÇÃO

A troca de gases entre o solo e a atmosfera é um processo vital para a saúde dos ecossistemas terrestres. A aeração do solo, que depende diretamente da sua capacidade de permitir o fluxo de ar, é essencial para a respiração das raízes das plantas e dos microrganismos do solo, influenciando diretamente o ciclo de nutrientes e a produtividade agrícola. Solos com boa estrutura possuem uma rede contínua de macroporos que facilitam a troca gasosa, enquanto solos compactados ou com excesso de umidade têm essa capacidade drasticamente reduzida, podendo levar a condições de falta de oxigênio prejudiciais ao desenvolvimento das plantas. Portanto, a medição e o monitoramento da permeabilidade ao ar são fundamentais para o diagnóstico de degradação do solo, a avaliação de práticas de manejo e a otimização da produção agrícola (GLIŃSKI; LIPIEC, 1990).

Além da estrutura física, a atividade biológica, refletida pela respiração do solo (efluxo de CO₂), é outro indicador vital da saúde do ecossistema. A medição conjunta da permeabilidade e da respiração oferece um diagnóstico completo, conectando as propriedades físicas que permitem o fluxo de gás com os processos biogeoquímicos que o produzem.

A determinação da permeabilidade do solo ao ar (K_a) em condições de campo é uma tarefa complexa. Assim como a condutividade hidráulica, a K_a é extremamente sensível à estrutura do solo, apresentando alta variabilidade espacial e temporal devido a fatores como manejo do solo, tráfego de máquinas, e ciclos de umedecimento e secagem (POULSEN et al., 2001).

Para contornar algumas dessas dificuldades de campo, frequentemente recorre-se a métodos labororiais, como os que utilizam infiltrômetros em amostras de solo. No entanto estes equipamentos, embora precisos, apresentam suas próprias desvantagens, como a necessidade de coletar amostras que mantêm sua estrutura original intacta — um processo que pode ser destrutivo e alterar justamente a propriedade que se deseja medir (BALL; SCHJØNNING, 2002). Somando-se a isso, os infiltrômetros de ar de campo já existentes no mercado são, muitas vezes, equipamentos caros, complexos e que exigem operadores especializados, tornando seu uso inviável para avaliações em larga escala ou para monitoramento contínuo (DI PRIMA, 2015).

A revolução da instrumentação, com a automação e o uso de eletrônica de baixo custo, emergiu como uma solução promissora para superar essas limitações. A instrumentação automatizada aumenta a velocidade, a precisão e a repetibilidade das medições, reduzindo o potencial de erro humano e permitindo a coleta de um grande volume de dados (FISHER; GOULD, 2012). Neste contexto, o desenvolvimento de sensores de pressão acessíveis e microcontroladores poderosos, como o ESP32, abre a possibilidade de criar instrumentos de campo personalizados, de baixo custo e alto

desempenho.

O dispositivo proposto neste trabalho aborda diretamente esse desafio, pois foi projetado para ser inserido no solo e realizar medições periódicas sem a necessidade de remoção ou de coleta de amostras. Princípio de funcionamento deste equipamento baseia-se em expelir um fluxo de ar controlado para o interior de uma câmara selada na superfície do solo. A pressão gerada dentro da câmara, que é função da resistência que o solo oferece ao fluxo de ar, é medida continuamente pelo sensor de pressão diferencial. Essa pressão é, por sua vez, diretamente relacionada à permeabilidade do solo ao ar (K_a). Esta abordagem permite uma análise não destrutiva e in-situ, possibilitando o estudo da dinâmica da estrutura do solo ao longo do tempo.

Diante desses desafios tecnológicos e da necessidade de métodos mais acessíveis e práticos, formulou-se a seguinte pergunta norteadora: como um infiltrômetro pneumático automatizado e de baixo custo pode ser desenvolvido e aplicado para avaliar de forma eficaz e não destrutiva a permeabilidade do solo ao ar, considerando os efeitos da perturbação estrutural e da umidade?

A partir dessa questão, este trabalho tem como objetivo geral propor e projetar um infiltrômetro pneumático automatizado de baixo custo, capaz de analisar tanto a permeabilidade do solo ao ar — sob diferentes condições de perturbação estrutural e umidade — quanto a respiração do solo, apresentando o método e a fundamentação teórica para sua futura validação em campo. Para alcançar este objetivo, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

1. Detalhar o projeto e a concepção construtiva do protótipo do infiltrômetro pneumático;
2. Especificar a arquitetura e a lógica operacional do firmware do microcontrolador utilizando a IDE Arduino;
3. Propor um protocolo de calibração para o sistema de medição;
4. Estruturar um protocolo para a execução de ensaios de campo sistemáticos;
5. Descrever o método para a conversão dos dados de pressão em valores de permeabilidade ao ar (K_a);
6. Definir a metodologia de análise estatística para avaliar os efeitos dos fatores estudados;
7. Integrar a arquitetura para medição da respiração do solo, especificando os componentes e o protocolo de calibração para o sensor de CO₂.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Física do Fluxo de Gás no Solo

O movimento de gases através da matriz porosa do solo é um processo fundamental que governa a aeração e a troca de substâncias com a atmosfera. A compreensão deste fluxo requer a análise de propriedades intrínsecas do solo e das

leis físicas que o descrevem. Esta seção aborda os conceitos centrais da permeabilidade ao ar, a Lei de Darcy adaptada para gases e os principais fatores relativos ao solo, como estrutura e umidade, que modulam este fenômeno.

2.1.1 Permeabilidade do Solo ao Ar e Lei de Darcy para Gases

A permeabilidade do solo ao ar (K_a) é a propriedade que descreve a facilidade com que o ar, ou outros gases, flui através da rede de poros do solo em resposta a um gradiente de pressão (IVERSEN et al., 2001). O fluxo de gases em meios porosos, sob condições de fluxo laminar, pode ser descrito por uma forma da Lei de Darcy, análoga àquela para o fluxo de água. A densidade de fluxo de gás (v_g) é proporcional ao gradiente de pressão e inversamente proporcional à viscosidade do gás.

É fundamental distinguir a permeabilidade ao ar (K_a) da permeabilidade intrínseca (k). A permeabilidade intrínseca é uma propriedade que depende exclusivamente da geometria do meio poroso (tamanho, forma, tortuosidade e conectividade dos poros) e é independente do fluido que o atravessa, tendo unidades de área. A permeabilidade a um fluido específico, como o ar (K_a) ou a água (condutividade hidráulica, K_s), está relacionada à permeabilidade intrínseca e às propriedades do fluido (densidade e viscosidade) (FREEZE; CHERRY, 1979). Como tanto o fluxo de ar quanto o fluxo de água em condições de saturação são governados pela mesma rede de macroporos, existe uma forte correlação entre a permeabilidade ao ar e a condutividade hidráulica saturada, fazendo da medição de K_a , que é mais rápida, um método indireto promissor para estimar K_s .

2.1.2 Fatores que Influenciam a Permeabilidade ao Ar

A permeabilidade ao ar é extremamente sensível a alterações na estrutura do solo. Os principais fatores que a influenciam são:

- **Estrutura e porosidade:** A K_a é dominada pelo volume e pela continuidade dos macroporos (BALL; SCHJØNNING, 2002). Solos bem estruturados, com alta macroporosidade, apresentam valores de K_a elevados. A compactação do solo destrói esses macroporos, reduzindo drasticamente a permeabilidade ao ar, mesmo que a porosidade total sofra pouca alteração (SWEENEY et al., 2006).
- **Umidade do solo:** O teor de água no solo é um dos fatores mais importantes que controlam a K_a . À medida que a umidade aumenta, a permeabilidade ao ar diminui acentuadamente e de forma não-linear. Este fenômeno é governado pelos complexos mecanismos do fluxo bifásico (ar-água), detalhados na Seção 2.2, que envolvem não apenas a simples redução do espaço poroso disponível, mas, crucialmente, o aumento da tortuosidade e o bloqueio de poros pela água. A água preenche preferencialmente os poros menores e os "gargalos" dos poros maiores, o que pode interromper a conectividade da fase gasosa e reduzir drasticamente a permeabilidade efetiva ao ar (BALL; SCHJØNNING, 2002).
- **Textura do solo:** A textura influencia a K_a indiretamente, através de seu efeito

na estrutura e na porosidade. Solos arenosos geralmente têm maior macroporosidade e, portanto, maior permeabilidade ao ar do que solos argilosos, quando não compactados.

O dispositivo desenvolvido neste TCC explora diretamente a medição da resistência do solo ao fluxo de ar para inferir a K_a , permitindo investigar experimentalmente como a perturbação da estrutura (simulando compactação) e a variação da umidade afetam essa propriedade crucial.

2.2 O Fenômeno do Fluxo Bifásico e o Efeito da Umidade no Fluxo de Ar

Embora o experimento principal deste trabalho envolva a injeção de ar, o solo em condições de campo é um sistema trifásico (sólido, água, ar). Portanto, o fluxo de ar injetado ocorre em um meio onde os poros já estão parcialmente preenchidos com água. Este é um processo de fluxo bifásico (ar-água), mas com o ar sendo a fase móvel principal (MOREL-SEYTOUX; BILLICA, 1985a).

A presença de água nos poros do solo afeta o fluxo de ar de duas maneiras principais:

1. **Redução da porosidade efetiva:** A água ocupa uma fração do volume total de poros, reduzindo o espaço disponível para o fluxo de ar. A porosidade disponível para o ar é o fator determinante (VOGELER et al., 2006).
2. **Aumento da tortuosidade e bloqueio de poros:** A água tende a se acumular nos poros menores e nos "gargalos" dos poros maiores devido à capilaridade. Isso força o ar a seguir caminhos mais longos através dos poros maiores e pode bloquear completamente a conectividade de certas redes de poros, reduzindo drasticamente a permeabilidade efetiva ao ar (BALL; SCHJØNNING, 2002)..

Este efeito é análogo ao fenômeno de "aprisionamento de ar" (*air entrapment*) que ocorre durante a infiltração de água, mas aqui o foco é invertido: investiga-se como a fase líquida (água) aprisionada e imóvel afeta o fluxo da fase gasosa (ar) (FAYBISHENKO, 1995). O delineamento experimental deste trabalho, que inclui a variação da umidade inicial do solo, permite quantificar diretamente a magnitude desse efeito de bloqueio.

2.3 Modelagem e Análise de Dados de Permeabilidade ao Ar

Diferentemente dos ensaios de infiltração de água, que são processos complexos descritos por modelos como os de Horton ou Philip, a medição da permeabilidade ao ar pode, em muitos casos, ser analisada sob condições de fluxo estacionário. Uma vez que a bomba de ar é acionada, a pressão dentro da câmara do infiltrômetro aumenta até atingir um valor de equilíbrio. Nesse ponto, a taxa de injeção de ar pela bomba é igual à taxa com que o ar escoa através do solo.

A análise dos dados consiste em relacionar a pressão de equilíbrio medida (ΔP) com a permeabilidade ao ar (K_a). Para um fluxo de gás em um meio poroso, a Lei de Darcy pode ser adaptada. Em sua forma mais simples para um infiltrômetro de campo, pode-se estabelecer uma relação onde a taxa de fluxo de ar (Q_g) é proporcional à permeabilidade ao ar e à pressão medida: $Q_g = C \cdot K_a \cdot \Delta P$.

Onde C é um fator geométrico que depende das dimensões do anel e das características do fluxo — se é predominantemente radial ou vertical —. Este fator é geralmente determinado através da calibração do dispositivo (ANKENY et al., 1988). Assim, a análise dos dados de campo se concentra em:

1. Registrar a série temporal de pressão durante o ensaio.
2. Identificar a pressão de equilíbrio (ΔP_{eq}) quando o sistema atinge o estado estacionário.
3. Utilizar a equação de calibração do instrumento para converter o valor de ΔP_{eq} em um valor de permeabilidade ao ar, K_a .

A tabela a seguir resume as principais diferenças conceituais entre a análise de dados de um infiltrômetro de água e um infiltrômetro de ar.

Tabela 1 – Comparativo conceitual entre infiltrômetros de água e o infiltrômetro de ar proposto

Característica	Infiltrômetro de água (de anel duplo)	Infiltrômetro de ar (proposto)
Processo físico	Infiltração de água, fluxo bifásico (água deslocando ar).	Injeção de ar, fluxo de gás em meio poroso úmido.
Grandeza medida	Queda do nível da água ou volume de água adicionado ao longo do tempo.	Pressão diferencial em estado estacionário.
Análise de dados	Ajuste de curvas de infiltração acumulada a modelos transientes (Horton, Philip, etc.).	Uso de pressão de equilíbrio e equação de calibração para obter um único valor de K_a por ensaio.
Parâmetro estimado	Condutividade hidráulica (K_{fs}), Sortividade (S).	Permeabilidade ao ar (K_a).

Fonte: O autor (2025).

2.4 Tecnologias de Medição e Benchmarks

2.4.1 Infiltrômetros de Ar e Infiltrômetros de Anel

Os dispositivos para medir a permeabilidade do solo ao ar em campo são menos comuns que os infiltrômetros de água. Os métodos existentes podem ser classificados em duas categorias: os que mantêm uma queda de pressão constante e os que utilizam um gradiente de pressão decrescente (KIRKHAM, 1946). O dispositivo proposto neste trabalho se enquadra na primeira categoria, pois a bomba de ar, em conjunto com o escoamento pelo solo, tende a estabelecer uma pressão de equilíbrio relativamente constante.

Os infiltrômetros de anel, tradicionalmente usados para água, fornecem um análogo estrutural útil (BOUWER, 1986). Um cilindro é inserido no solo para definir a área de medição. No nosso caso, em vez de adicionar água, a câmara acima do solo é selada e pressurizada com ar.

2.4.2 O Método BEST: Um Ponto de Contraste

O método BEST (*Beerkan Estimation of Soil Transfer parameters*) é um procedimento amplamente utilizado para a caracterização hidráulica do solo, combinando um ensaio de infiltração de anel simples com análises laboratoriais básicas (LASSABATÈRE et al., 2006). Embora seja um padrão de referência para a estimativa da condutividade hidráulica (K_s), o método BEST apresenta desvantagens significativas em termos de eficiência e aplicabilidade.

Primeiramente, o procedimento é intensivo em mão de obra, exigindo a presença constante de um operador durante todo o ensaio para adicionar repetidamente pequenos volumes de água e cronometrar a infiltração (DI PRIMA, 2015). Em solos de baixa permeabilidade, atingir o estado estacionário pode ser um processo extremamente demorado. Em segundo lugar, o método é suscetível a erros do operador e à variabilidade de sua habilidade, introduzindo incerteza nos resultados. A aplicação repetida de água pode perturbar a superfície do solo e o aprisionamento de ar pode afetar as medições de forma não controlada, levando a uma menor precisão e maior variabilidade nos parâmetros estimados, como demonstrado por Di Prima (2015), que encontrou um coeficiente de variação para K_s 2.1 vezes maior com o método Beerkan manual em comparação com seu infiltrômetro automatizado. Finalmente, o método BEST é inherentemente destrutivo, pois requer a coleta de amostras de solo para análise de textura e densidade em laboratório, impedindo o monitoramento contínuo no mesmo local (LASSABATÈRE et al., 2006).

Em contraste, o infiltrômetro pneumático proposto neste trabalho oferece uma alternativa rápida, automatizada e não destrutiva. A medição da permeabilidade ao ar leva segundos ou minutos, em vez de horas, e não requer a coleta de amostras de solo, permitindo medições repetidas no mesmo ponto para avaliar a dinâmica temporal da estrutura do solo. Embora meça uma propriedade diferente, permeabilidade ao ar vs. condutividade hidráulica, a K_a é um excelente indicador da estrutura do solo, que é

o mesmo atributo físico que o BEST busca caracterizar indiretamente.

2.5 Eletrônica de Baixo Custo para Geociências

A recente proliferação de plataformas de hardware de código aberto e sensores de baixo custo tem revolucionado a instrumentação científica, permitindo o desenvolvimento de dispositivos personalizados e acessíveis para monitoramento ambiental e geocientífico (FISHER; GOULD, 2012).

2.5.1 Microcontrolador ESP32

O ESP32 é um microcontrolador poderoso e de baixo custo que se destaca por seu processador dual-core, múltiplos conversores analógico-digitais (ADC) e também conectividade Wi-Fi e Bluetooth integrada (THALHEIMER, 2013). Essas características o tornam ideal para este projeto, pois ele pode realizar a aquisição de dados do sensor, controlar a bomba de ar e, em futuras iterações, transmitir os dados sem fio para um servidor ou aplicativo móvel.

2.5.2 Sensores de Pressão

A medição precisa da pressão é central para este trabalho. O sensor MPXV7002DP, da NXP Semiconductors, foi o escolhido para o protótipo. Este é um sensor piezoresistivo de pressão *diferencial*, projetado para medir a diferença de pressão entre duas portas (NXP, 2015). Sua faixa de operação (0 a 3.92 kPa), saída analógica proporcional e compensação de temperatura o tornam perfeitamente adequado para esta aplicação, onde se espera medir pequenas sobrepressões em relação à atmosfera. A escolha deste sensor, similar ao utilizado em outros trabalhos de instrumentação de campo (DI PRIMA, 2015), confere uma base sólida ao design do sistema.

3 PROJETO E ARQUITETURA DO SISTEMA

3.1 Concepção e Estrutura Mecânica

O projeto do infiltrômetro foi concebido para ser robusto, portátil e de baixo custo, utilizando materiais de fácil acesso. A estrutura mecânica é composta por duas partes principais:

- Câmara de pressão:** Um cilindro de plástico com diâmetro interno de 15 cm e altura de 20 cm. A borda inferior do tubo circular tem facilidade de inserção no solo com mínima perturbação, garantindo uma vedação eficaz contra vazamentos de ar laterais. Este "tubo de marionete" modificado funciona como uma câmara de pressurização. Sua vedação é crucial para permitir a criação de

uma sobrepressão de ar no espaço livre acima da superfície do solo.

2. **Caixa de controle e conexões:** Uma caixa de passagem elétrica à prova d'água (caixa cinza, conforme detalhado nas figuras 1 e 2) foi fixada lateralmente ao conjunto. Esta caixa abriga todos os componentes eletrônicos. Della partem os tubos de silicone que conectam a saída da mini bomba de ar ao interior da câmara de pressão.



Figura 1 - Protótipo do infiltrômetro pneumático parcialmente montado.

Fonte: O autor.

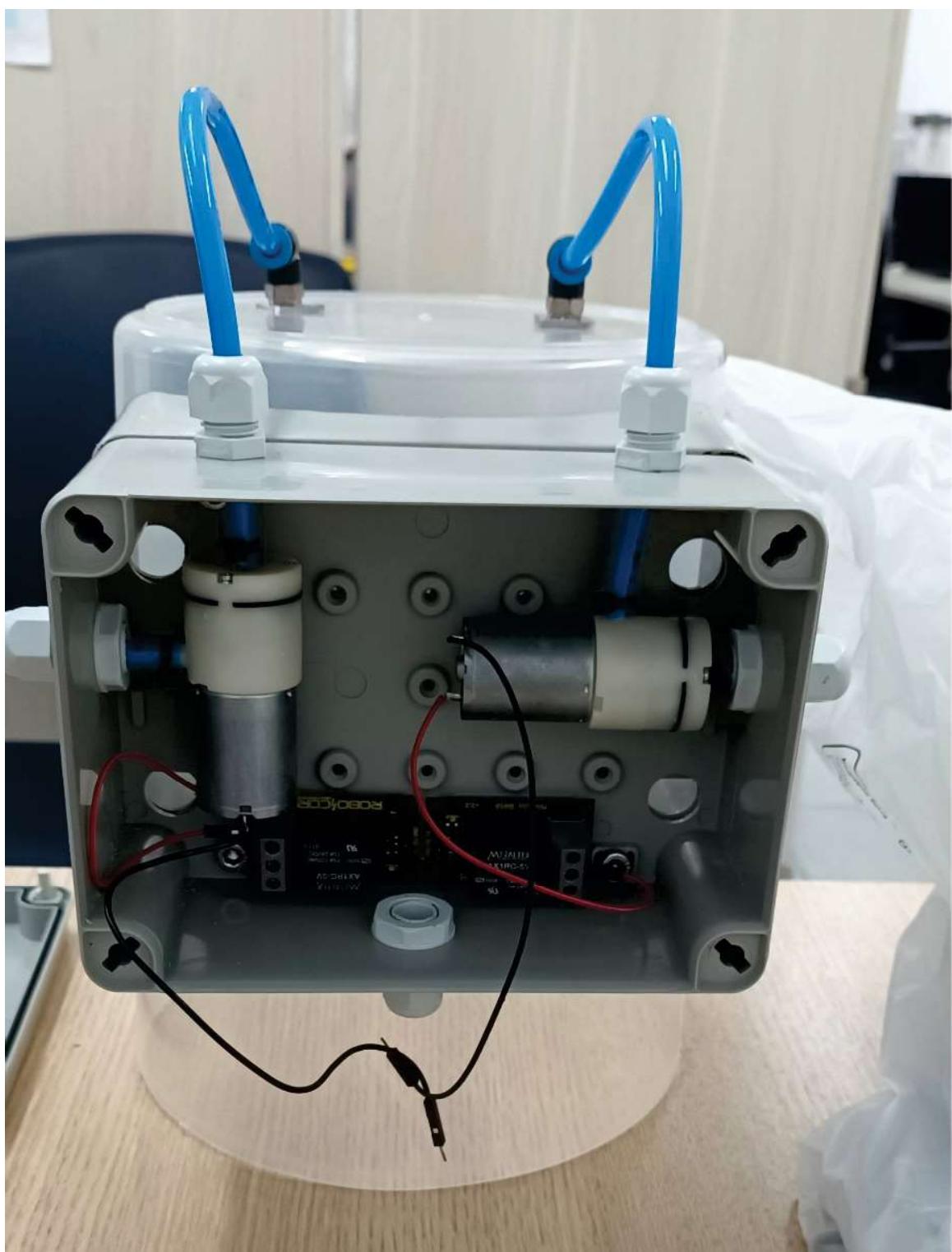


Figura 2 - Circuito interno do protótipo do infiltrômetro pneumático.

Fonte: O autor.

3.2 Sistema Eletrônico e de Controle

O cérebro do sistema é um microcontrolador ESP32. O sistema eletrônico completo consiste nos seguintes componentes:

- **Microcontrolador:** Módulo ESP32.
- **Sensor de pressão:** Um sensor de pressão diferencial de alta precisão, modelo NXP MPXV7002DP, para medir a sobrepressão dentro da câmara em relação à atmosfera.
- **Sistema de injeção de ar:** Composto por duas mini bombas de ar. Uma é designada para a pressurização da câmara, e a outra para a exaustão rápida ao final do ensaio. Ambas são controladas individualmente por um módulo de relé duplo, que isola o circuito de potência das bombas do circuito de controle do ESP32.
- **Sensor de gás carbônico (CO₂):** Adicionalmente, com o intuito de expandir o leque de análise do protótipo para além da permeabilidade, o projeto integrará um sensor de dióxido de carbono, modelo MH-Z19. Este sensor opera com base no princípio de infravermelho não dispersivo (NDIR), que mede a concentração de CO₂ através da absorção de luz infravermelha. O sensor possui uma alta precisão, que o torna ideal para estudos de respiração do solo.
- **Armazenamento de dados:** O Armazenamento final será feito através de um módulo de cartão MicroSD para o registro local e permanente de todos os dados do ensaio. Este método de armazenamento garante a integridade dos dados independentemente de fatores externos.
- **Fonte de alimentação:** Um conjunto de baterias ou uma fonte de alimentação externa, no intuito de garantir a portabilidade do equipamento.

3.3 Firmware e Lógica de Operação

O firmware embarcado no ESP32 foi projetado em linguagem C/C++ através do Arduino Software (IDE), com uma lógica de operação estruturada para a automação do ensaio e a integridade dos dados. O fluxo de execução do programa é o seguinte:

1. **Inicialização:** Ao ser ligado, o sistema realiza uma verificação geral de todos os componentes, inicializando a comunicação serial, os pinos de I/O, e testando a conexão com o sensor de pressão e o cartão SD. Em caso de falha em algum componente crítico, o processo é abortado.
2. **Criação do arquivo de dados:** Ao início de cada medição um novo arquivo de dados no formato CSV é criado no cartão SD, com um nome único e característico, com marcação de horário por exemplo, para evitar a sobreposição de dados.
3. **Loop de medição:** O ensaio automatizado se inicia com a bomba de ar injetando um fluxo de ar controlado na câmara de pressão. O ESP32 monitora a

pressão constantemente, registrando tempo e pressão em intervalos regulares. A pressão se estabiliza em um valor de equilíbrio quando a taxa de escoamento de ar através do solo se iguala à taxa de injeção constante da bomba, neste momento o sistema de armazenamento se tornará mais preciso.

4. **Término do ensaio:** Após um certo tempo de medição o sistema de armazenamento de dados será finalizado, realiza a gravação dos dados e salva o arquivo no cartão SD. Assim concluindo o ensaio e deixando o equipamento pronto para a próxima medição.

3.4 Arquitetura para medição da respiração do solo

Além de medir a permeabilidade ao ar, a arquitetura estrutural do protótipo permite sua expansão para quantificar outros fluxos de gases, como o efluxo de CO₂ do solo, através da anexação de outros sensores, um processo conhecido como respiração do solo. A respiração do solo é o segundo maior fluxo de carbono entre os ecossistemas terrestres e a atmosfera e seu estudo é fundamental para a ciência do ciclo do carbono (CUEVA et al., 2016).

A integração do sensor de CO₂ MH-Z19 ao sistema permitiria adaptar o equipamento para funcionar de maneira análoga aos sistemas de câmara fechada, não-estacionária, um método padrão para medir a respiração do solo. O princípio de funcionamento consiste em selar a câmara na superfície do solo e medir o aumento da concentração de CO₂ ao longo do tempo.

A Figura 3 ilustra o esquema conceitual de um sistema de medição de gases do solo, similar ao que pode ser implementado com a expansão do protótipo. Neste sistema, uma bomba de ar circula o ar de dentro da câmara através de um analisador de gás infravermelho, que no caso do protótipo seria o sensor MH-Z19, registrando a variação da concentração de CO₂.

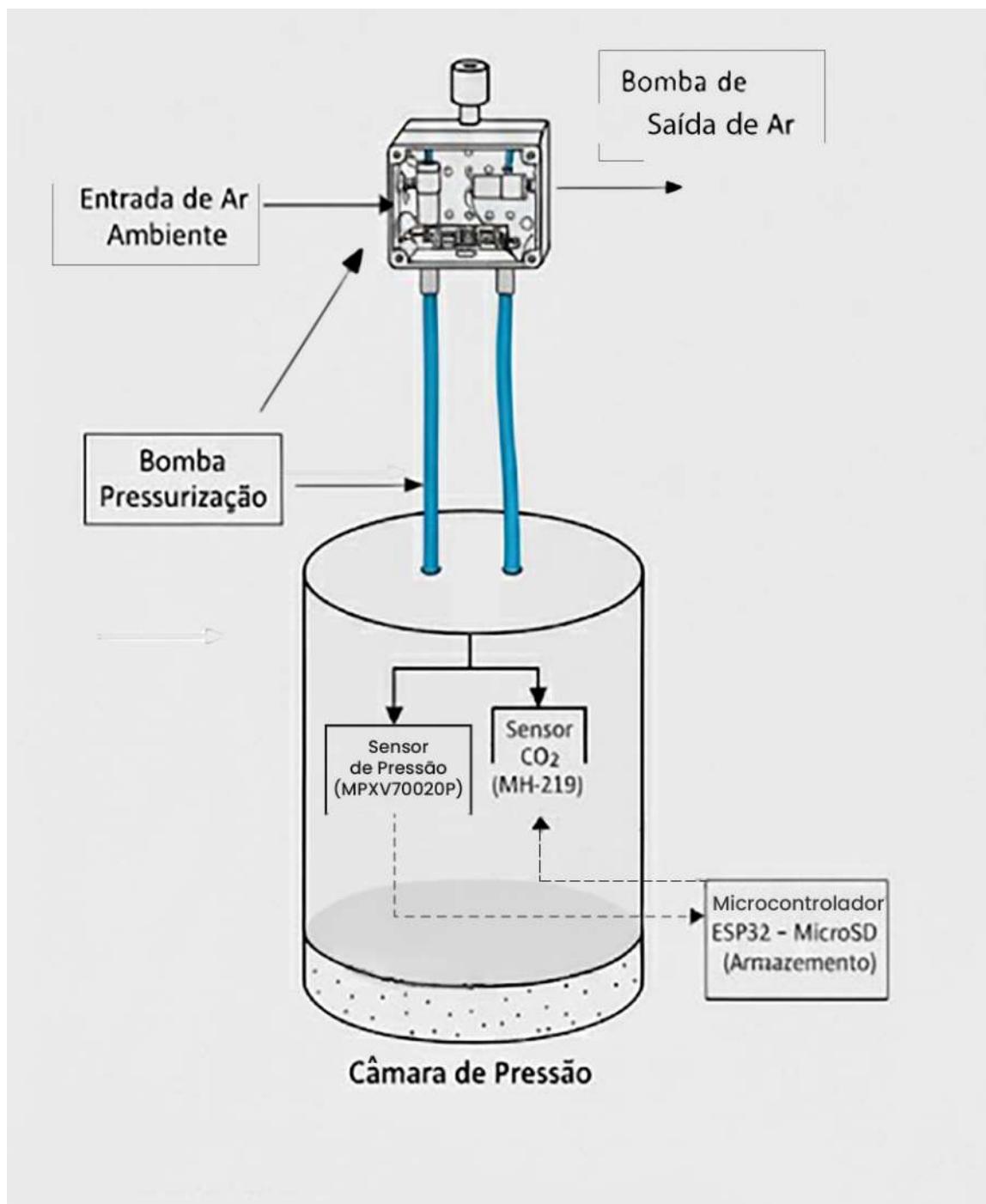


Figura 3 - Diagrama conceitual da arquitetura do sistema, integrando os módulos de medição de permeabilidade ao ar e de respiração do solo.
Fonte: O autor.

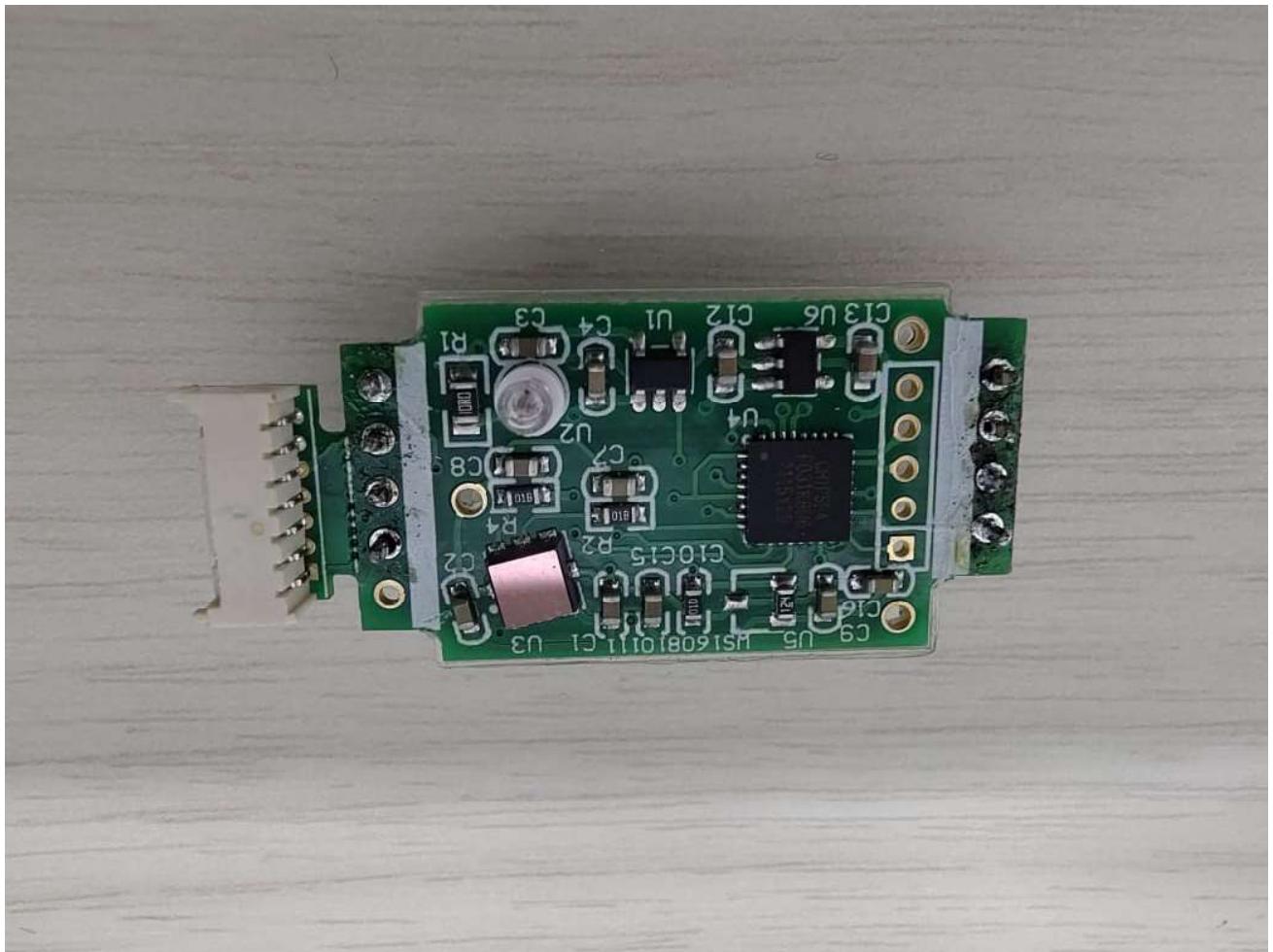


Figura 4 - Sensor de CO₂, MH-Z19.

Fonte: O autor.

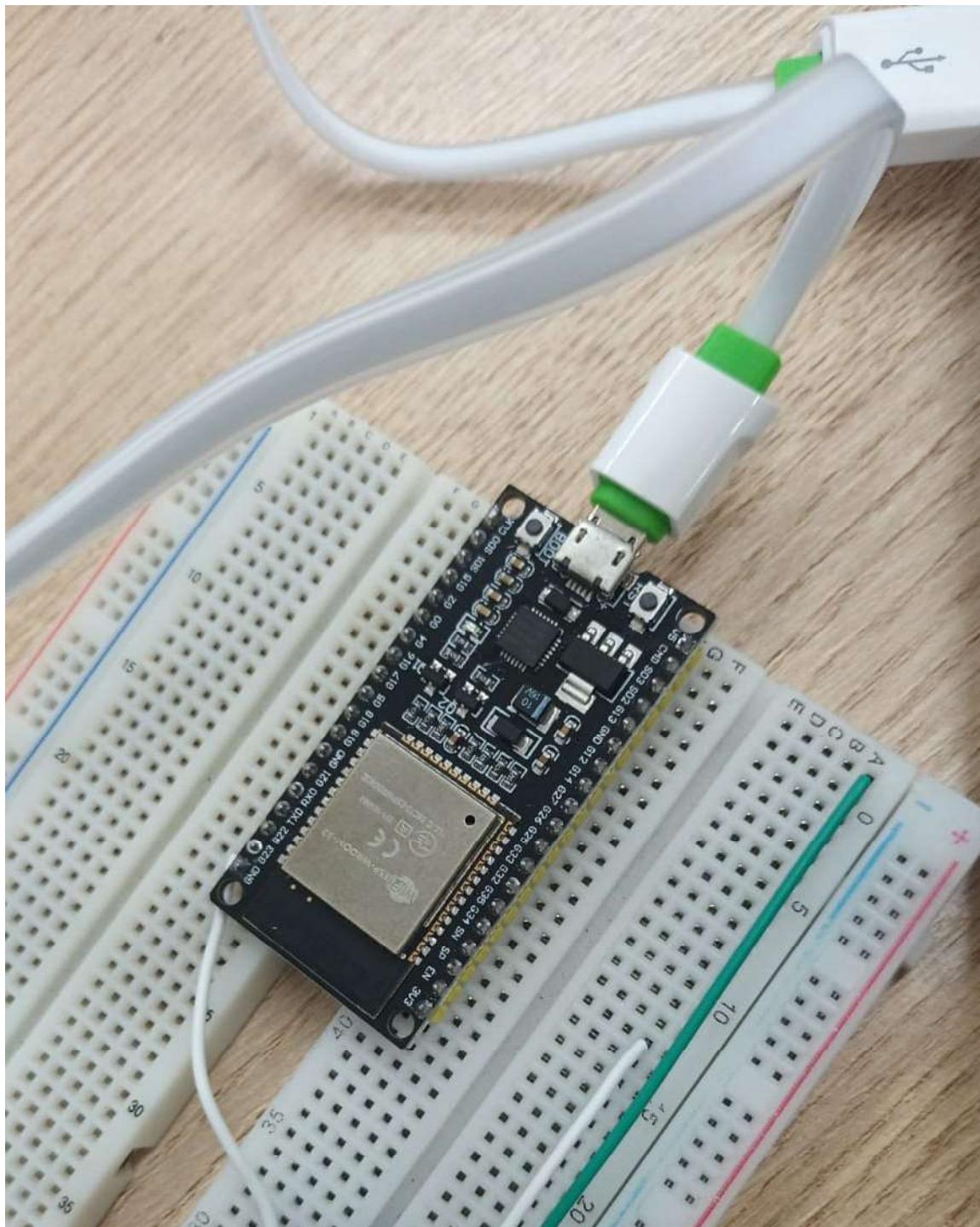


Figura 5 - Placa de desenvolvimento ESP32.

Fonte: O autor.

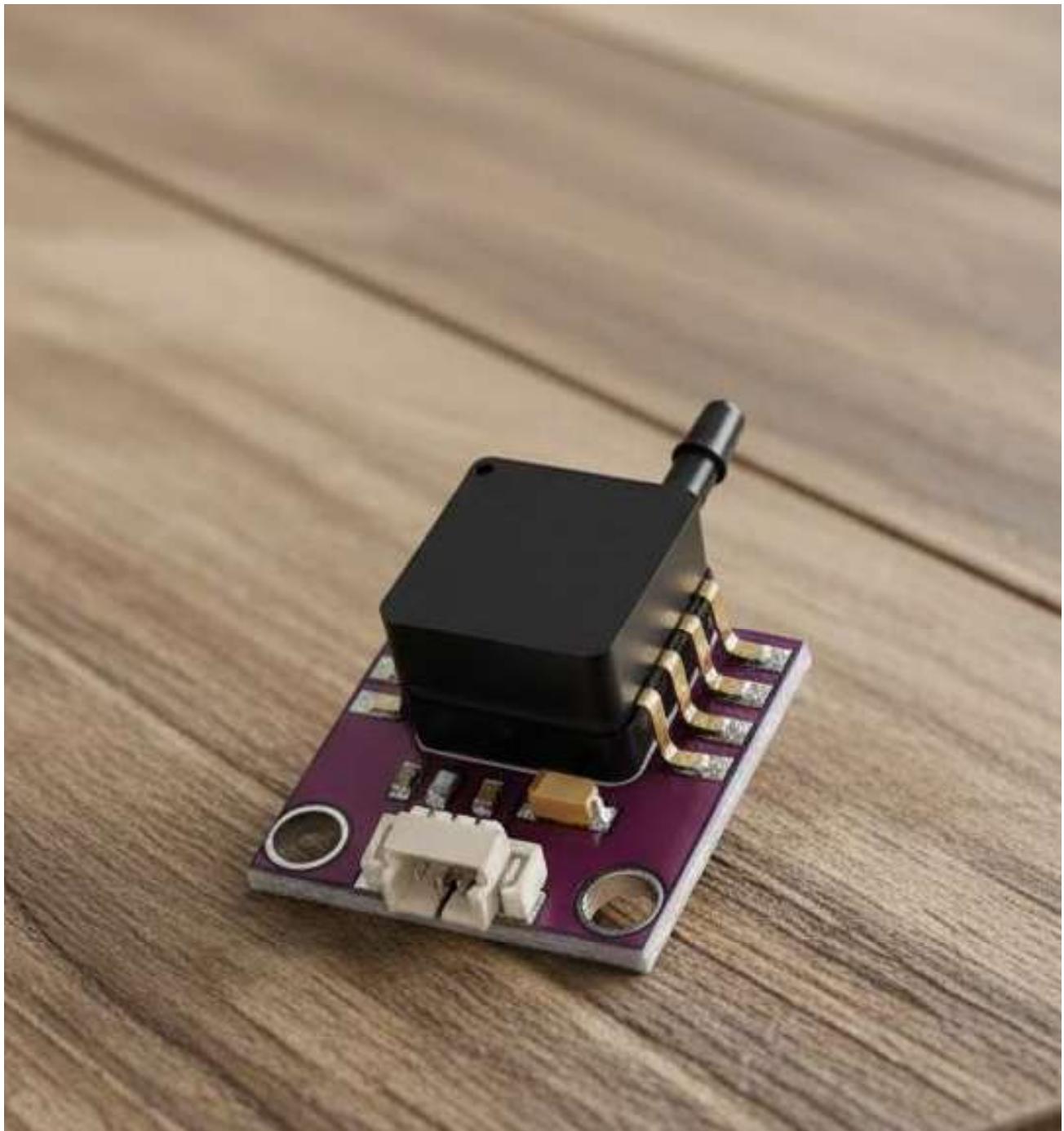


Figura 6 - Sensor de pressão MPXV7002DP.

Fonte: O autor.

4 PROTOCOLO PROPOSTO PARA CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL

4.1 Calibração do Sistema de Medição

O plano de calibração consiste em testar o infiltrômetro em meios porosos de permeabilidades conhecidas — como, por exemplo, amostras de areia com diferentes graus de compactação e umidade. Com os valores de pressão medidos em cada um destes meios, é possível uma “chave de tradução” para analisar a permeabilidade de um solo ao ar, que será uma equação desenvolvida que permitirá transformar qualquer leitura de pressão obtida em campo no seu valor correspondente de permeabilidade ao ar, independentemente do tipo do solo.

4.2 Delineamento Experimental

Propõe-se um delineamento experimental fatorial para investigar os efeitos dos fatores de interesse e sua possível interação. Os fatores e seus respectivos níveis serão:

- A. **Fator 1: Perturbação estrutural do solo (PE)**
 - a. Nível 1: Sem perturbação (SP) - Ensaios realizados na condição natural do solo.
 - b. Nível 2: Com perturbação (CP).
- B. **Fator 2: Umidade inicial do solo (θ_i)**
 - a. Nível 1: Umidade baixa (UB) - Ensaios realizados em condições de solo naturalmente seco.
 - b. Nível 2: Umidade alta (UA).

A combinação desses fatores resultará em quatro tratamentos: SP-UB, CP-UB, SP-UA, CP-UA. Para cada tratamento, serão realizadas várias réplicas dentro da área de estudo, a fim de garantir íntegros valores estatísticos.

4.3 Procedimento de execução dos ensaios

O procedimento para cada ensaio de campo deve seguir os seguintes passos:

1. Inserção de um sensor para medir a umidade inicial do solo (θ_i).
2. Posicionamento e vedação do infiltrômetro no solo.
3. Início do sistema de registro de dados no ESP32.
4. Acionamento da bomba de ar, iniciando a injeção de ar na câmara.
5. O ensaio prossegue por um tempo fixo enquanto os dados de pressão em equilíbrio são registrados.
6. O registro de dados é interrompido, e o arquivo é salvo localmente.

4.4 Análise de Dados e Estatística

4.4.1 Processamento de Dados Brutos

Os dados obtidos a cada medição devem ser armazenados em um cartão de memória microSD pelo ESP32, gerando um arquivo individual CSV cujo seus valores serão separados por vírgula. Após o armazenamento, estes dados serão transferidos para um computador onde os mesmos poderão receber tratamento quantitativo.

4.4.2 Estimativa da Permeabilidade ao Ar (K_a)

A estimativa da permeabilidade do solo ao ar será realizada a partir dos dados de pressão coletados em campo pelo sensor MPXV7002DP. Para transformar esse indicador em um dado quantitativo, será utilizada a equação de calibração descrito na seção 4.1 e, ao aplicar essa equação, cada valor de pressão obtido em campo será convertido em seu respectivo valor de permeabilidade ao ar (K_a), permitindo a comparação objetiva entre os diferentes tratamentos do estudo.

4.4.3 Análise Estatística

Para testar formalmente as hipóteses do estudo, deve ser empregada uma análise de variância (chamada de ANOVA) de dois fatores. As hipóteses nulas (H_0) testadas são:

- H_0,PE : A perturbação estrutural não tem efeito significativo sobre a permeabilidade ao ar (K_a).
- H_0,θ_i : A umidade inicial do solo não tem efeito significativo sobre a K_a .
- $H_0,PE \times \theta_i$: Não existe interação significativa entre os efeitos da perturbação estrutural e da umidade inicial.

4.5 Calibração e Validação do Sensor de CO₂

Para garantir a precisão das medições de dióxido de carbono, o sensor MH-Z19 requer um protocolo de calibração e validação. O método proposto baseia-se nas funcionalidades do próprio sensor e em referências atmosféricas conhecidas.

Primeiramente, o sensor deve ser configurado para o modo de calibração automática. Este modo é especialmente indicado para aplicações em campo, como em ambientes de floresta urbana ou mata nativa, onde há uma passagem constante de ar fresco. O firmware do sensor utiliza o ponto mais baixo de CO₂ medido ao longo de um período, de geralmente 24 horas, como o ponto de referência de 400 ppm (partes por milhão), que corresponde à concentração aproximada de CO₂ na atmosfera global.

Para a validação do procedimento, o sensor deve ser deixado ligado em um ambiente externo bem ventilado por um período de 24 horas para permitir a estabilização e a autocalibração. Após esse período, as medições devem ser

comparadas com o valor de referência de 400 ppm para confirmar a precisão do sensor.

5 RESULTADOS ESPERADOS E DISCUSSÃO

5.1 Hipóteses Fundamentadas na Teoria

A partir da física do fluxo em meios porosos, é possível estabelecer hipóteses precisas sobre os resultados que seriam alcançados com o delineamento experimental sugerido. A teoria indica que a compactação do solo destrói a continuidade dos macroporos, que são as principais vias para o fluxo de ar. Portanto, espera-se que as dinâmicas com perturbação (CP) apresentem valores de permeabilidade ao ar significativamente inferiores aos tratamentos sem perturbação (SP), com a umidade mantendo-se constante. De forma análoga, a água presente no solo ocupa o espaço poroso, bloqueando fisicamente os caminhos para o fluxo de ar e aumentando a dificuldade da passagem de ar pelo percurso. Consequentemente, espera-se que os tratamentos com umidade alta (UA) apresentem valores de K_a significativamente inferiores aos tratamentos com umidade baixa (UB), mantendo-se a condição de perturbação constante. Adicionalmente, uma análise mais aprofundada sugere a existência de uma interação significativa entre os fatores. O efeito negativo da compactação sobre a K_a deve ser exacerbado em condições de alta umidade. Em um solo que já foi compactado, os poucos macroporos que restam são essenciais para a aeração, e a adição de água a esse sistema obstrui exatamente essas vias remanescentes, resultando em uma redução da permeabilidade mais do que proporcional. Portanto, formula-se a hipótese de que a diferença percentual de K_a entre os tratamentos SP e CP será maior no cenário de umidade alta do que no cenário de umidade baixa.

5.2 Análise dos Valores de Permeabilidade ao Ar (K_a)

Para ilustrar essas hipóteses, a tabela abaixo apresenta um conjunto de dados hipotéticos para a permeabilidade ao ar. É importante ressaltar que estes valores não são derivados de um modelo matemático preditivo, mas sim valores relativos escolhidos para demonstrar a magnitude e a direção esperadas dos efeitos principais e de interação, conforme descrito na Seção 5.1. O objetivo é fornecer uma representação quantitativa clara das consequências teóricas que o protocolo experimental visa testar.

Tabela 2 – Resultados esperados com base no modelo físico

Tratamento	Permeabilidade ao Ar esperada (valor relativo)	Justificativa Teórica
Sem Perturbação - Umidade Baixa (SP-UB)	100	Condição de referência: macroporos intactos e desobstruídos, consequentemente fluxo de ar máximo.
Com Perturbação - Umidade Baixa (CP-UB)	40	Compactação destrói macroporos, reduzindo consideravelmente a K_a .
Sem Perturbação - Umidade Alta (SP-UA)	30	Poros intactos, mas parcialmente bloqueados pela água, reduzindo a K_a .
Com Perturbação - Umidade Alta (CP-UA)	10	O caso mais cruzado: macroporos destruídos pela compactação e os restantes bloqueados pela água.

Fonte: O autor (2025).

5.3 Discussão das Implicações Científicas e Práticas

A confirmação de padrões como apresentados na tabela da seção 5.2 apresentaria impactos extremamente importantes: Primeiramente, validaria o infiltrômetro como uma ferramenta sensível e precisa, capaz não só de diferenciar os efeitos isolados de umidade e compactação, mas também de suas interações complexas e a tradução das mesmas. Isso demonstraria sua grande utilidade para a análise da física do solo.

Do ponto de vista prático, um dispositivo capaz de distinguir esses quatro cenários de forma rápida e não destrutiva teria aplicações diretas na agricultura de precisão e no manejo ambiental. Poderia ser usado para mapear zonas de compactação em lavouras, avaliar a eficácia de práticas de preparo do solo, otimizar a irrigação para evitar a saturação e monitorar a recuperação da estrutura do solo em áreas degradadas. A capacidade de coletar grandes volumes de dados de K_a de forma econômica permitiria estudos de variabilidade espacial e temporal que atualmente são inviáveis com os equipamentos caros e complexos existentes no mercado.

5.4 Resultados Esperados para a Respiração do Solo

Para a funcionalidade de medição de CO₂, espera-se que os resultados revelem uma correlação positiva entre a medição de CO₂ e a temperatura do solo, até um ponto ótimo. Adicionalmente, prevê-se que solos com maior teor de matéria orgânica e umidade adequada (nem seco, nem saturado) apresentarão taxas de respiração significativamente maiores, refletindo uma maior atividade microbiana e radicular. A validação desses padrões confirmaria a capacidade do protótipo de atuar como uma ferramenta para estudos do ciclo do carbono.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho de conclusão de curso apresentou o projeto conceitual, a arquitetura de hardware e software, e o protocolo de validação para um infiltrômetro pneumático automatizado de baixo custo. A proposta teórica permitiu focar na robustez do design e na fundamentação científica que o sustenta.

A principal contribuição deste estudo está na combinação de eletrônica de baixo custo e de código aberto com um problema real da física do solo, levando a uma solução que inclui a identificação de uma lacuna tecnológica e metodológica na medição da permeabilidade do solo ao ar, o projeto detalhado de uma solução de hardware e software acessível e portátil e a apresentação de um protocolo rigoroso para sua calibração e validação.

Com base nesta análise teórica foi possível concluir que o infiltrômetro proposto tem um alto potencial para se tornar uma ferramenta eficaz para pesquisa e manejo do solo. Sua capacidade de fornecer medições rápidas, não destrutivas e *in situ* representa um avanço significativo sobre os métodos convencionais, que são frequentemente caros, lentos e destrutivos.

O estudo realizado abre algumas possibilidades lógicas para pesquisas futuras e para a melhoria do dispositivo. As recomendações a seguir são sugeridas como os próximos passos razoáveis:

- 1. Construção e calibração do protótipo:** O primeiro passo consiste na montagem física do protótipo conforme especificado na seção 3 e na execução do protocolo de calibração descrito na seção 4.1 para estabelecer a relação quantitativa entre a pressão medida e a permeabilidade ao ar.
- 2. Execução dos ensaios de campo:** Com o protótipo calibrado, a etapa seguinte é a realização do experimento fatorial proposto na seção 4.2 para validar a sensibilidade do dispositivo aos efeitos da compactação, da umidade e de suas interações, comparando os resultados obtidos com as hipóteses teóricas.
- 3. Aprimoramento do protótipo:** A plataforma ESP32 oferece oportunidades para futuras melhorias, como a incorporação de conectividade sem fio (Wi-Fi ou

Bluetooth) para a transmissão de dados em tempo real para um servidor ou aplicativo móvel. Isso eliminaria a necessidade de recuperação manual do cartão SD e permitiria o monitoramento contínuo e remoto, consolidando sua dupla funcionalidade para análises de permeabilidade e de respiração do solo.

REFERÊNCIAS

- AHMED, F.; BORST, M. Monitoring infiltration rates with time domain reflectometers. *Water*, v. 11, n. 7, p. 1401, 2019.
- AHMED, F.; GULLIVER, J. S.; NIEBER, J. L. Field infiltration measurements in stormwater infiltration practices. *Vadose Zone Journal*, v. 15, n. 7, 2021.
- ANKENY, M. D.; KASPAR, T. C.; HORTON, R. Design for an automated tension infiltrometer. *Soil Science Society of America Journal*, v. 52, p. 893-896, 1988.
- BACH, L. B.; WIERENGA, P. J.; WARD, T. J. Estimation of the Philip Infiltration Parameters from Rainfall Simulation Data. *Soil Science Society of America Journal*, v. 50, n. 5, p. 1319-1323, 1986.
- BALL, B. C.; SCHJØNNING, P. Air permeability. In: DANE, J. H.; TOPP, G. C. (Eds.). **Methods of soil analysis: Part 4 Physical methods**. Madison: Soil Science Society of America, 2002. p. 1141-1158.
- BOUWER, H. Intake rate: cylinder infiltrometer. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of soil analysis: Part 1 Physical and mineralogical methods**. 2. ed. Madison: American Society of Agronomy, 1986. p. 825-844.
- BROOKS, R. H.; REEVE, R. C. Measurement of Air and Water Permeability of Soils. *Transactions of the ASAE*, v. 2, n. 1, p. 12-14, 1959.
- CECILIA, A.; SUDARSANAN, S. K. A survey of wireless technologies for smart grid. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON WIRELESS COMMUNICATIONS, SIGNAL PROCESSING AND NETWORKING (WISPNET), 2016, Chennai. *Anais [...]*. Chennai: IEEE, 2016. p. 1-6.
- CUEVA, A. et al. Soil respiration in Mexico: Advances and future directions. *Terra Latinoamericana*, v. 34, n. 3, p. 253-269, 2016.
- DAVID, Sunith John et al. A novel methodology for infiltration model studies. *International Journal of Engineering Technologies and Management Research*, v. 5, n. 3, p. 190-199, mar. 2018. DOI: 10.5281/zenodo.1218178. Disponível em: <https://journals.indexcopernicus.com/api/file/viewByFileId/235135.pdf>. Acesso em: 21 jun. 2025.
- DI PRIMA, S. Automated single ring infiltrometer with a low-cost microcontroller circuit. *Computers and Electronics in Agriculture*, v. 118, p. 390-395, 2015.

- DOHNAL, M. et al. Three-Dimensional Numerical Analysis of Water Flow Affected by Entrapped Air: Application of Noninvasive Imaging Techniques. **Vadose Zone Journal**, v. 12, n. 1, 2013.
- FAYBISHENKO, B. A. Enhanced infiltration in arid zones: a review. **Journal of Hydrology**, v. 164, n. 1-4, p. 1-34, 1995.
- FISHER, D. K.; GOULD, P. J. Open-source hardware is a low-cost alternative for scientific instrumentation and research. **Modern Instrumentation**, v. 1, n. 2, p. 8-20, 2012.
- FREEZE, R. A.; CHERRY, J. A. **Groundwater**. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1979.
- GLIŃSKI, J.; LIPIEC, J. **Soil physical conditions and plant roots**. Boca Raton: CRC Press, 1990.
- HORTON, R. E. An approach toward a physical interpretation of infiltration-capacity. **Soil Science Society of America Proceedings**, v. 5, p. 399-417, 1940.
- HUANG, M.; RODGER, H.; BARBOUR, S. L. An evaluation of air permeability measurements to characterize the saturated hydraulic conductivity of soil reclamation covers. **Canadian Journal of Soil Science**, v. 95, n. 1, p. 15-26, 2015.
- IVERSEN, B. V. et al. In situ, on-the-fly characterization of soil aeration. **Soil Science**, v. 166, n. 7, p. 453-464, 2001.
- KIRKHAM, D. Field method for determination of air permeability of soil in its undisturbed state. **Soil Science Society of America Proceedings**, v. 11, p. 93-99, 1946.
- LASSABATÈRE, L. et al. Beerkan estimation of soil transfer parameters through infiltration experiments-BEST. **Soil Science Society of America Journal**, v. 70, n. 2, p. 521-532, 2006.
- METER GROUP. **Field saturated hydraulic conductivity-why is it so difficult?** METER Group, [s.d.]. Disponível em: <https://metergroup.com/measurement-insights/field-saturated-hydraulic-conductivity-why-is-it-so-difficult/>. Acesso em: 21 jun. 2025.
- MOREL-SEYTOUX, H. J.; BILLICA, J. A. A two-phase flow model for the infiltration process. **Hydrological Sciences Journal**, v. 30, n. 4, p. 479-496, 1985.
- NXP. **MPxx5004, 0 to 3.92 kPa, Differential and Gauge, Integrated Pressure Sensor**. Data Sheet: Technical Data Rev. 12.1. Freescale Semiconductor, 2015.
- POULSEN, T. G. et al. Spatial and temporal dynamics of air permeability in a sandy loam soil. **Soil Science**, v. 166, n. 3, p. 153-165, 2001.
- RANDOM NERD TUTORIALS. **ESP32 Data Logging Temperature to MicroSD Card**. 2024. Disponível em: <https://randomnerdtutorials.com/esp32-data-logging-temperature-to-microsd-card/>. Acesso em: 26 jun. 2025.
- RIVERSIDE COUNTY. **Low Impact Development BMP Design Handbook**. 2011.
- RODRIGUES, S. **Permeabilidade ao ar em Latossolo Vermelho sob plantio direto e**

- preparo convencional.** 2009. 114 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2009.
- SANTOS, R.; SANTOS, S. ESP32: Guide for MicroSD Card Module using Arduino IDE. **Random Nerd Tutorials**, 2021. Disponível em:
<https://randomnerdtutorials.com/esp32-microsd-card-arduino/>. Acesso em: 26 jun. 2025.
- SILVA, Á. P. da *et al.* Determinação da permeabilidade ao ar em amostras indeformadas de solo pelo método da pressão decrescente. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 6, p. 1565-1574, 2009.
- SNEDECOR, G. W.; COCHRAN, W. G. **Statistical methods**. 8. ed. Ames: Iowa State University Press, 1989.
- SWEENEY, D. W. *et al.* Soil physical and chemical properties as affected by tillage and nitrogen fertilization. **Soil Science Society of America Journal**, v. 70, n. 2, p. 487-494, 2006.
- THALHEIMER, M. A low-cost electronic tensiometer system for continuous monitoring of soil water potential. **Journal of Agricultural Engineering**, v. 44, n. 3, p. e16, 2013.
- TORLAPATI, J. **Horton's Model**. [s.d.]. Disponível em:
<https://www.torlapati.com/resources/wre/Hortons%20Model.pdf>. Acesso em: 10 jul. 2025.
- VOGELER, I. *et al.* The effect of compaction on air and water transport properties of a volcanic ash soil. **Soil and Tillage Research**, v. 89, n. 1, p. 76-87, 2006.
- WANG, Z. *et al.* Two phase flow infiltration equations accounting for air entrapment. **Water Resources Research**, v. 33, n. 12, p. 2759-2767, 1997.