



ISSN:1984-2295

Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe>



Sistema Automatizado para Determinação de Teor de Umidade do Solo por Micro-ondas

Gilmar Gonçalves de Brito¹; Meuse Nogueira de Oliveira Junior²; Roberto Quental Coutinho³

¹Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco (IFPE), Departamento de Eletrônica, Recife, PE, Brasil, gilmarbrito@reitoria.ifpe.edu.br; ²Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco (IFPE), Departamento de Eletrônica, Recife, PE, Brasil, meusejr@gmail.com>. ³Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil. Av. Acadêmico Hélio Ramos S/N, Cidade Universitária, 50740530 - Recife, PE – Brasil. Tel: (81) 21267526. robertoqcoutinho@gmail.com

Artigo recebido em 15/03/2023 e aceito em 04/08/2023

RESUMO

Neste artigo é apresentado o desenvolvimento de um sistema para determinação do teor de umidade do solo. Um forno de micro-ondas foi modificado com a introdução de um módulo de célula de carga e um módulo microprocessado Arduino, de forma a permitir a captura das medidas de massa. Todo o sistema é controlado e monitorado por um software instalado em um computador, sendo possível a geração de dados gravimétricos das amostras de solo, de modo a se detectar o patamar de massa mínima (massa do solo seco). Para os testes de avaliação do sistema, foram utilizados diferentes tipos de solo, sendo a verificação da precisão dos dados comparados ao método padrão de estufa. Os resultados preliminares demonstraram que o sistema para a determinação de umidade do solo foi capaz de traçar curvas dos padrões de evaporação da água durante o processo de desumidificação das amostras, demonstrando uma variação em função da classe textural do solo. Além disso, os valores de secagem de amostras de solo indicaram que o sistema desenvolvido possui precisão similar aos valores de secagem do método de estufa representando um modo rápido, prático, preciso e de baixo custo, sendo uma alternativa acessível para uso em laboratórios e campo.

Palavras-chave: gravimetria, determinação do teor de umidade, caracterização geotécnica.

Automated system for microwave soil moisture content determination

ABSTRACT

This article presents the development of a system for determining soil moisture content. A microwave oven was modified with the introduction of a load cell module and an Arduino microprocessor module, to allow the capture of mass measurements. The entire system is controlled and monitored by software installed on a computer, making it possible to generate gravimetric data from soil samples, to detect the minimum mass level (dry soil mass). For the system evaluation tests, different types of soil were used, with verification of data accuracy being compared to the standard oven method. Preliminary results showed that the system for determining soil moisture was capable of tracing curves of water evaporation patterns during the dehumidification process of the samples, demonstrating a variation as a function of soil textural class. In addition, the drying values of soil samples indicated that the developed system has similar precision to the drying values of the oven method, representing a fast, practical, accurate, and low-cost mode, being an accessible alternative for use in laboratories and field.

Keywords: gravimetry, moisture content determination, geotechnical characterization.

Introdução

A avaliação do teor de umidade nos solos é de fundamental importância para muitas aplicações nas áreas de engenharia civil, geotécnica e agrônoma. A umidade do solo atua como um fator de ligação entre os materiais do solo, afetando

assim a estabilidade e a resistência estrutural do solo. As condições de umidade dos solos influenciam diretamente sobre os fluxos de infiltração, resistência ao cisalhamento, compressibilidade, bem como a condutividade

elétrica e hídrica do solo. Estas informações, são indispensáveis na elaboração de análises geotécnicas, presentes em grandes edificações, construção de estradas (rodovias), nos taludes em geral e também com grande impacto na engenharia agrônoma (agricultura), para a produtividade das culturas (Ansari et al., 2017; Arezou et al., 2020; Jastrzębska, 2019; Rodrigues, 2017; Salas et al., 2018; Shamir et al., 2018; Younis et al., 2015; Sagayaraj et al., 2021).

Usualmente, a determinação do teor de umidade do solo é baseada em técnicas gravimétricas de observações *ex situ*, sendo o método de estufa o mais utilizado. Embora, este método apresente elevada precisão, não tendo necessidade de calibração, o processo de análise consome cerca de 24 horas, precisando ser mantida a uma temperatura de 105° C, gerando um alto consumo de energia (Brocca et al., 2017; Jalilian et al., 2017; Santos et al., 2019; de Lima Pereira et al., 2021; Silva et al., 2021; Yu et al., 2021).

Os métodos alternativos de secagem para a determinação do teor de umidade têm sido desenvolvidos com o objetivo de diminuir o tempo do processo, bem como torna mais pragmático esse processo de análise. A principal diferença entre os diferentes métodos, encontra-se na fonte de calor utilizada destacando-se os métodos baseados em forno micro-ondas, álcool, speedy, e frigideira (Arezou et al. 2020; Ribeiro et al. 2018; Rodrigues 2017).

Particularmente, o método de forno de micro-ondas tem apresentado precisão semelhante ao método estufa, sendo amplamente utilizado em diversos ramos da indústria em geral, como, por exemplo: cocção e desidratação de alimentos, secagem de materiais (por ex: geológicos), aceleração de reações químicas, tratamento de células cancerígenas e processamento de polímeros (COELHO, 2022; GOMES et al., 2022; Passos et al., 2019; Zolini et al., 2022)

Diversos estudos têm descritos a vantagem do método de forno micro-ondas para determinação do teor de umidade de amostras de solos, possibilitando um menor tempo do processo e redução de custo (Cremon et al., 2014; De Oliveira et al., 2016; Jalilian et al., 2017; Jastrzębska, 2019; Kalnar et al., 2018; Miller et al., 1974; Mohamad et al., 2020; Usman et al., 1986; Gaspard, 2022).

Contudo, levando-se em contas as práticas de manuseio para pesagem das amostras, o processo de análise exige cuidado especial, de preservação sobre os interferentes externos como a umidade do próprio ambiente que podem interferir

para a precisão dos dados. Além disso, os fornos de micro-ondas comuns não são suportados com recursos complexos para detectar parâmetros como temperatura, peso e disponibilidade de material carregado. Devido à falta de disponibilidade de material, diversas aplicações laboratoriais e industriais requerem esses recursos para desligar o forno (Thamer et al., 2021). Para isto, visando, promover uma melhor praticidade do método de forno micro-ondas, alguns projetos tem sido proposto, por exemplo: Introdução de célula de carga para calcular o peso do alimento no forno de micro-ondas (Alrazaaq, 2016), o controle automático de temperatura e potência (Monteiro et al., 2020).

Neste contexto, este artigo apresenta o desenvolvimento de um sistema automatizado que permite a medição em tempo real do teor de umidade de amostras de solo, dispensando o uso de pesagem manual. O sistema compreende um forno de micro-ondas modificado, tendo sob à base de seu prato giratório uma célula de carga (balança eletrônica) e um módulo microprocessado (Arduino), que foi implantado no interior do forno de micro-ondas, possibilitando a captura dos dados gravimétricos das amostras, além de controlar o acionamento do forno em si. O sistema compõe ainda de um aplicativo de *software*, desenvolvido para permitir que o operador configure os modos de medida e registre todo o processo em forma de relatório para posteriores análises. Assim, a determinação do teor de umidade de em tempo real por este sistema pode permitir a obtenção de curvas padrões de evaporação da água do solo sob análise.

Material e métodos

O presente trabalho foi realizado no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco (IFPE), campus Recife - Brasil, no Laboratórios de Construção Civil (LCC) e no Laboratório de Desenvolvimento e Extensão de Tecnologia Eletrônica e Robótica (DEXTER) do Grupo de Pesquisa de Sistemas Embarcados e Redes de Sensores (GPSERS) em consonância com a Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) no laboratório do Grupo de Engenharia Geotécnica de desastres e Planícies GEGEP.

Equipamentos e Adaptações do Sistema

O sistema foi desenvolvido através de uma adaptação do forno micro-ondas introduzindo uma balança eletrônica (célula de carga), para obtenção de dados gravimétricos e um Arduino que

possibilita a interação por meio da porta USB que interliga o computador ao módulo eletrônico embutido no forno, possibilitando o controle de operação do forno. O sistema computacional de atuação e sensoriamento compreende os softwares como aplicativo de PC e o firmware do sistema eletrônico (Arduino). A descrição dos elementos do sistema de automação e suas características do são:

1. Forno de micro-ondas da marca Midea, modelo MTFB41; com as seguintes características: capacidade de 31L; tensão elétrica 220V; potência: 900W; frequência da rede elétrica: 60Hz; frequência de micro-ondas 2450MHz; diâmetro do prato: 315mm, com 10 níveis de potência selecionáveis.
2. Uma célula de carga de 2Kg, com potência nominal de saída $1.0\text{mV/V} \pm 0,15\text{mV/V}$; alimentação elétrica 3 a 12 VDC; tensão máxima de operação de 15VDC; impedância de entrada de $410 \pm 30 \Omega$; impedância de saída $350 \pm 3 \Omega$; isolamento $> 2000 \text{ M}\Omega/50\text{VDC}$; faixa de temperatura de compensação de -100 a $+40^\circ\text{C}$; faixa de temperatura de operação de -20 a $+60^\circ\text{C}$; sobre carga permitida $<120\%$ da carga nominal; carga de ruptura $>150\%$ da carga nominal; classe de proteção IP65; dimensões $80\text{mm} \times 12,7\text{mm} \times 12,7\text{mm}$;
3. Módulo eletrônico de interface, conversor de sinais analógicos em digitais modelo HX711;

padrão de comunicação com o computador do tipo TTL 232; tensão de operação 4,8 a 5,5VDC; corrente de operação de 1,6 mA; Temperatura de operação de -20°C a 85°C ; interface SPI; e dimensões $29 \times 17 \times 4\text{mm}$ (sem pinos);

4. Módulo microprocessador Arduino Uno duemilanove com microcontrolador ATmega328; tensão de entrada de 7 a 12V; tensão de operação 5V; 14 portas digitais (I/O) com 6 portas de saídas com PWM; 06 pinos analógicos; corrente DC máxima por portas (I/O) 40mA; corrente DC para 3,3 V de saída 50mA; clock de 16MHZ;
5. Uma Placa multiplexadora / demultiplexadora constituída de quatro CIs CD4051, de ampla gama de sinais digitais variando de 3 a 20V, e os sinais analógicos de $\leq 20 \text{ VPP}$; baixa resistência em ON 125Ω (típico); alta resistência OFF; faixa de entrada de sinal de 18V, para maiores detalhes ver datasheet CD4051.

Para a conversão do forno de micro-ondas também foi substituído o prato giratório por uma cuba de porcelana de 85 mm de diâmetro, e 35mm de profundidade, com a função específica de receber as amostras de solos (Figura 1).

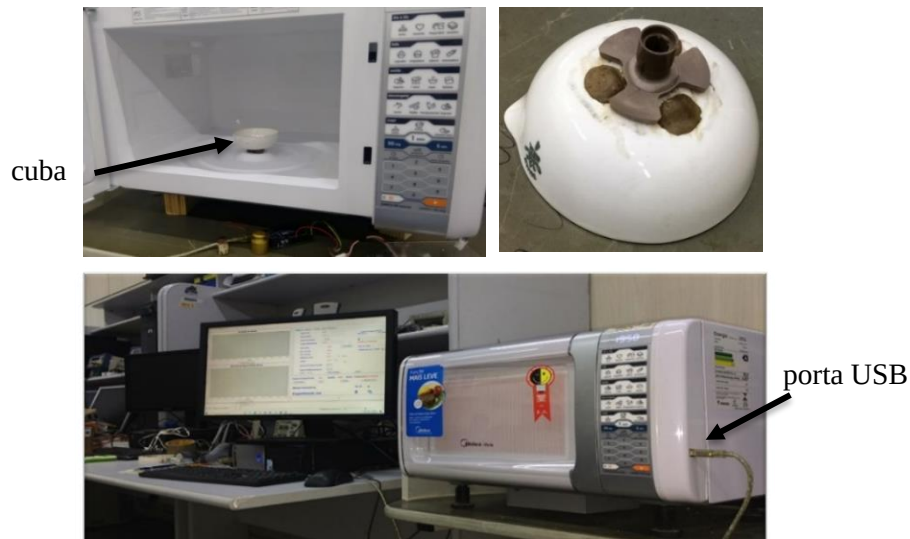


Figura 1. Instalação da cuba no forno de micro-ondas e adaptação com a base de apoio do prato giratório

Para a pesagem das amostras, foi introduzido na cavidade inferior do forno, abaixo

do motor do prato giratório, uma célula de carga de capacidade de medida de 2Kg, constituindo a

balança do sistema, (Figura 2). Destaca-se, que não foram necessárias mudanças no design do forno, em função dos arranjos eletromecânicos, mantendo o conjunto os mesmos padrões de segurança de uso estabelecidos pelo seu fabricante e pelas normas IEEE.

Para a configuração eletrônica do sistema também foi introduzido um conjunto de módulos,

(Figura 3), onde pode-se ver o arranjo de conexões entre o módulo eletrônico de interface, a placa de controle do forno, um módulo eletrônico de interface com a balança e módulo microcontrolador Arduino

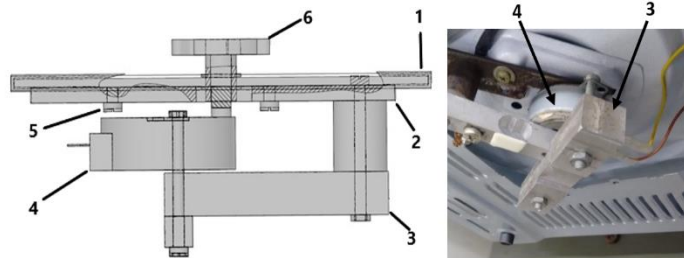


Figura 2. Arranjo eletromecânico no forno de micro-ondas para introdução da célula de carga a baixo do motor: (1) base de micro-ondas; (2) base de célula de carga; (3) célula de carga; (4) motor de micro-ondas; (5) parafuso Φ 4mm ; (6) base de prato de micro-ondas

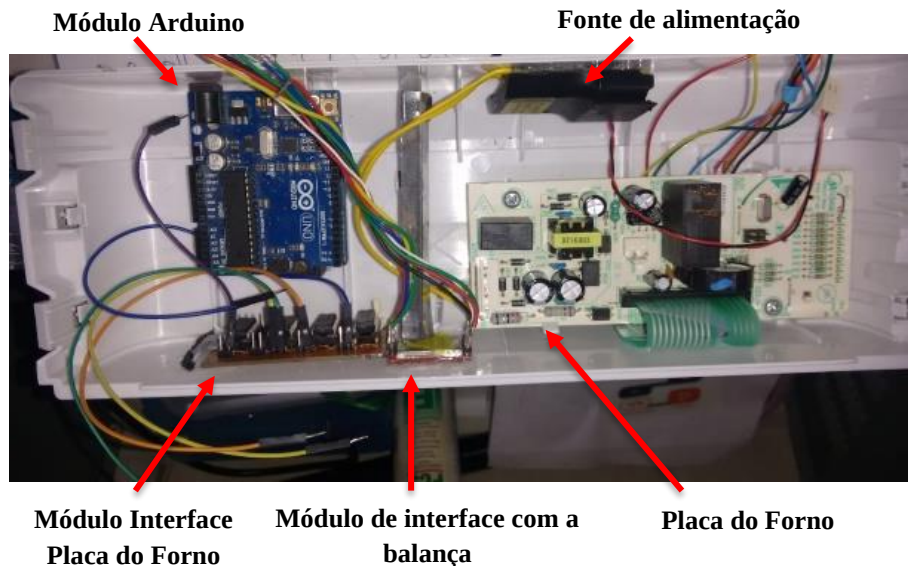


Figura 3. Circuitos inseridos no micro-ondas

Módulo Eletrônico de Interface com a Placa de Controle do Forno

A interface eletrônica para a comunicação do sistema com o forno de micro-ondas e o computador é demonstrado no fluxograma da figura 4. Neste processo, a placa de controle do forno de micro-ondas é comandada pela placa multiplexadora, controlada pelo Arduino, e comunica-se com o computador por meio do aplicativo desenvolvido. Os dados são coletados da célula de carga a partir da interface HX711 que envia as informações para o Arduino e este faz um pré-processamento de dados e os envia para o computador. Estes dois sistemas de dados

proporcionam o controle e monitoramento das amostras.

Para o acionamento das funções de controle, foi realizada uma reconfiguração na placa do circuito impresso do controle do forno (PCI), na conexão que interliga o teclado matricial de membrana, permitindo inserção de comandos vindos do computador. Para otimizar tais interseções, foi desenvolvido o módulo eletrônico de interface com a placa de controle do forno, sendo a comunicação com o teclado de membrana realizada por meio de um circuito multiplexador. A comunicação foi implementada colocando-se as vias do multiplexador em paralelo com as linhas e

colunas do teclado membrana. Isso permite que o sistema possa ser operado tanto manualmente, por meio dos controles feito diretamente no painel do

forno, ou automaticamente por meio do sistema desenvolvido (via software). O arranjo técnico realizado pode ser visualizado na figura 5.

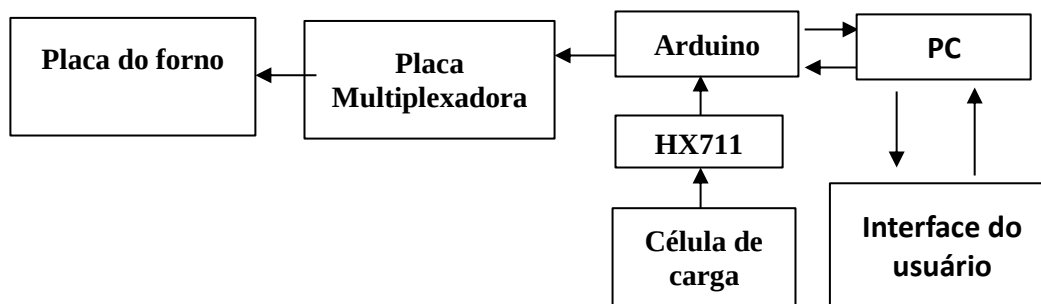


Figura 4. Fluxograma de dados do sistema

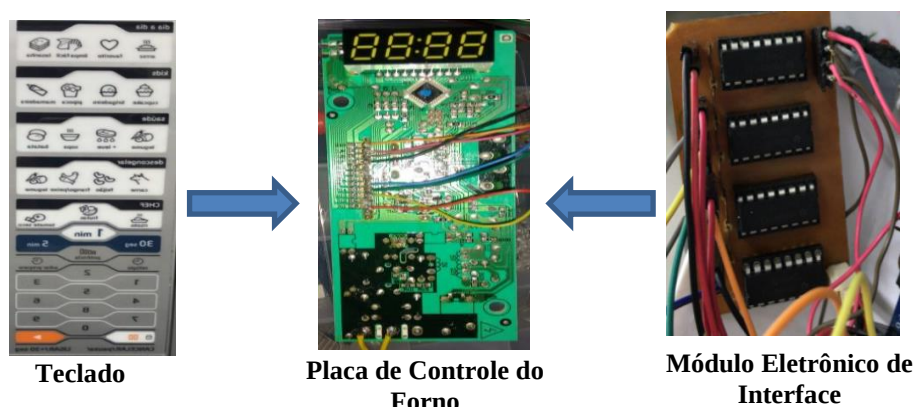


Figura 5. Interligação ao conector da PCI do micro-ondas para o circuito multiplexador

Módulo Eletrônico de Interface com a Balança

Este módulo foi utilizado para alimentação elétrica dos *strain gauges* da célula de carga, e receber os sinais elétricos provenientes deles para serem tratados, amplificados e transformados em informações digitais. Este módulo faz da interligação da célula de carga com o Módulo Arduino, que fornece a informações pré-processadas das variações do peso (massa) sobre a célula de carga, enviada ao computador.

O sistema foi desenvolvido tendo como base as características da célula de carga de 2kg, e

um módulo de interface controlador de carga. O módulo HX711 é energizado por uma fonte de alimentação específica, fixada na cavidade do painel de comando do forno, ao lado dos demais circuitos eletrônicos. A fonte de alimentação extra foi necessária em função do módulo Arduino não possuir potência o suficiente para este circuito adicional, nem tão pouco o circuito de controle do forno de micro-ondas, esses elementos estão representados na figura 6

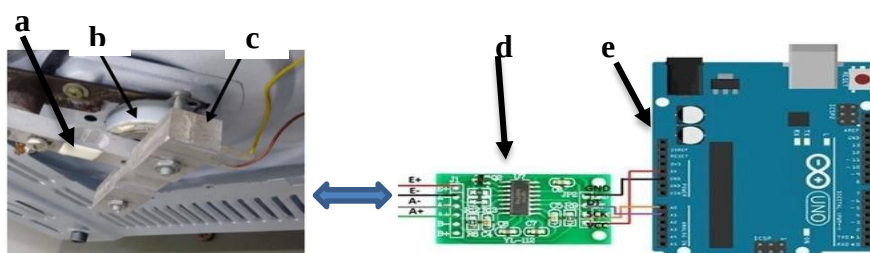


Figura 6 - Conjunto gavimétrico: (a) strain gauge; (b) motor do prato; (c) suporte do conjunto strain gauge; (d) módulo de interface com a balança e (e) módulo arduino

Desenvolvimento do hardware

Para os três elementos de hardware constituintes do sistema: módulo interface da balança, módulo interface da placa de controle do forno e um módulo microprocessador, Arduino. O módulo da interface da placa de controle do forno teve que ser especificamente desenvolvido para o sistema. Os demais foram implementados com

base em módulos pré-existent no mercado. Para o módulo interface da placa de controle do forno, foi implementado tanto a concepção do circuito eletrônico, como o projeto, confecção, montagem e testes da placa de circuito impressor (PCI). O diagrama do circuito eletrônico da placa e o layout da PCI são apresentados na figura 7.

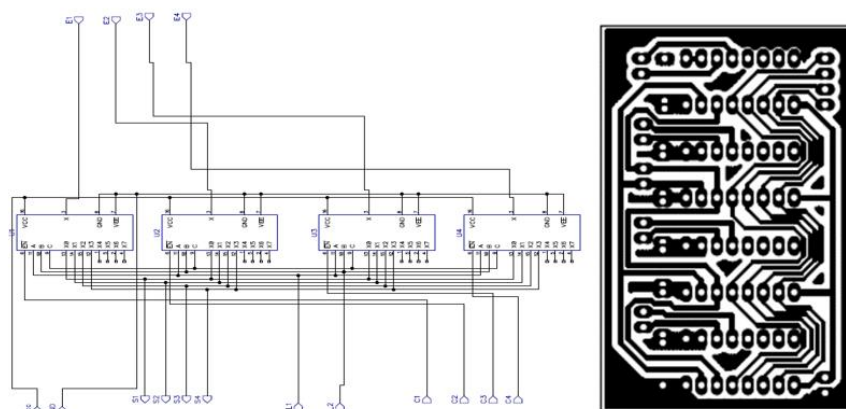


Figura 7. Esquema elétrico e layout do circuito impresso da placa de interface

Desenvolvimento de software

O sistema de software, foi desenvolvido foi desenvolvido na linguagem JAVA, sendo, portanto, portátil para qualquer sistema operacional, o que permitir a visualização das informações e análises. Para tal, ele apresenta em sua interface de usuário a curva de saída da água, bem como a medição instantânea do teor de umidade do solo em tempo real. O software foi construído em duas partes, aqui designados *back-end* e *front-end*.

O *back-end* tem como função de receber os sinais da célula de carga e tratar (filtra e processar); interpretar as informações de variação de massa (com precisão e 0,01g), bem como executar a operação remota do forno. O *front-end* compreende uma interface gráfica amigável na qual o usuário pode configurar e acompanhar o ensaio. O *front-end* também permite a análise *off-line* de dados de ensaios prévios, possibilitando a reconstituição virtual que ajuda a detectar artefatos e eventos que possam ter comprometido o ensaio. Os registros dos ensaios são armazenados em arquivos XML (*eXtensible Mark Language*) o que permite acesso para outros sistemas e banco de dados. Além disso, o *front-end* compreende as áreas de entrada e saída,

sendo estabelecidas com janelas de amostragem das medidas de dispersão (estatísticas), janelas de comandos e a janela de inserção de parâmetros.

A área do operador está dividida em duas: gráficos de amostragem de secagem do solo, - saída da água no tempo de análise-, apresentação dos parâmetros referentes às medições do teor de umidade. Para a entrada de dados tem-se: (i) tipo de solo; (ii) identificação da amostra; (iii) tempo máximo da análise; (iv) ajuste da potência do forno; (v) intervalo máximo de variação de massa da amostra que a classifica como amostra seca – estabelecendo o fim do ensaio; (vi) tempo máximo de ensaio e (vii) peso da amostra. Durante o ensaio o operador pode visualizar a massa instantânea; o percentual do experimento/ensaio em andamento e a construção do gráfico de variação da massa da amostra. O operador também visualiza ao final do ensaio: peso da amostra; peso do solo seco; peso da água; teor de umidade. Na parte inferior da interface dispõe-se os comandos: a) reset; b) peso de referência; c) salvar arquivo; d) tara; e) começar. A figura 8, apresenta a janela da interface do software e demonstra a saída de água da amostra.



Figura 8. Interface do software desenvolvido (A), área dos parâmetros (B)

Calibração do forno de micro-ondas

Para a calibração do forno de micro-ondas foram determinados a quantidade de calor recebido pela radiação, potência útil, e rendimento do forno de micro-ondas, conforme as equações a seguir.

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta t = m \cdot c \cdot (t_f - t_i) \quad \text{Equação (1)}$$

Onde:

Q = quantidade de calor recebido pela radiação; C = é o calor específico = $1 \text{ cal/g}^\circ\text{C}$; m = massa de água no becker; Δt variação da temperatura da água no becker; T= tempo em que o forno ficará ligado;

A potência total é dada pelo fabricante do forno (900W), enquanto a potência útil é dada pela equação 2.

$$pot_{\text{út}} = Q/t \quad \text{Equação (2)}$$

Enquanto o rendimento está representado pela formula da equação 3.

$$\eta = \frac{P_u}{P_t} \quad \text{Equação (3)}$$

Calibração da célula de carga:

Para a calibração da célula de carga em si, foi adotado o método de comparação de balança. Para isto, foi utilizada uma balança de precisão (1:200g/0,01g) sendo efetuado a correção/calibração da medida por software até chegar ao valor de referência

A metodologia consistiu em efetuar as leituras produzidas pela célula de carga, eliminando os erros por análise estatística. Para isto, foram realizadas 500 leituras, postas em ordem crescentemente para se analisar a distribuição gaussiana da frequência de valores. Isso permite a eliminação de espúrios presentes, identificados nos extremos da curva gaussiana. A curva é passível de visualização durante a execução do ensaio, permitindo a percepção da regularidade estatística das medidas. Nos ensaios realizados neste trabalho foram eliminados do cálculo a média os valores dos extremos da curva - 20% (início) e 20% (final). Desta forma, foi executada uma média aritmética das leituras dos 60% do centro dos valores centrais da curva gaussiana correspondente, A visualização da curva gaussiana que permite o acompanhamento da consistência estatística das medidas realizadas no processo (Figura 9).



Figura 9. Demonstração da Gaussiana

Caracterização física e determinação do teor de umidade do solo

Para os ensaios da caracterização física e determinação do teor de umidade foram utilizados quatro tipos de solos. As análises de granulometria por peneiramento e sedimentação, foi regulado pelo método de ensaio ABNT NBR 7181/2016. A classificação textural das amostras de solo foram realizadas segundo a metodologia de (Casagrande, 1948).

No procedimento de determinação do teor de umidade pelo forno de micro-ondas, o sistema foi tarado e determinada sua potência (10%, 20%, 30% ... a 100%, da potência total) em função das amostras de solo. Dada a natureza de aplicação do micro-ondas (uso doméstico), foram necessárias estabelecer salvaguardas e cuidados no uso para prevenir o superaquecimento da amostra, bem como queima da válvula (magnetron) responsável pela geração das micro-ondas. Para atender um adequado funcionamento do equipamento, bem como, uma menor influência sobre as amostras de

solo, as análises para determinação do teor de umidade foram calculadas para 60% do valor da potência real que equivale 508,2 W a um tempo de 10 a 20 minutos.

Adicionalmente, cada amostra de solo selecionada também foi comparado com o método da estufa (ABNT, 2012). Para isso, foram utilizadas 50g de amostras de solo, para comprovar que o sistema de forno de micro-ondas removeu completamente a umidade do solo em análise, as amostras processadas no sistema proposto foram pós-processadas pelo método da estufa, sendo detectadas variações residuais, indicando traços de umidade da amostra processada.

O tratamento dos dados dos ensaios sobre o teor de umidade nas amostras de solos foi realizado com auxílio da ferramenta do Excel, e para análise das variâncias entre as medidas foi utilizado o tratamento estatístico ANOVA com teste de Tukey para significativos grupos ao nível 5% pelo programa Statistic 7.

Resultados

Neste trabalho, o desenvolvimento de um sistema automatizado por micro-ondas conseguiu promover a determinação do teor de umidade de forma precisa, prática e mais rápida quando comparado com o método de referência (Estufa). Destaca-se que, o sistema autonomizado manteve a funcionalidade normal do equipamento, sem risco de vazamento de micro-ondas, obedecendo às

normas de segurança. Além disso, a configuração eletrônica com introdução da célula de carga e o módulo de aquisição, permitiu a automação da pesagem das amostras de solo, não sendo necessários manuseios posteriores de pesagem das amostras, o que poderia afetar o estado real das análises. A introdução do sistema micro processado, com arranjos eletrônicos específicos,

permitiu a transmissão dos dados e o acionamento remoto tal que, as informações das análises possam ser acessadas em computador, *tablete* e/ou *smartfone*.

Os resultados da caracterização física dos solos, pela análise granulométrica, demonstraram uma variação percentual no conteúdo de areia, silte e argila, sendo a classificação textual destas amostras apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Granulometria e caracterização física das amostras dos solos

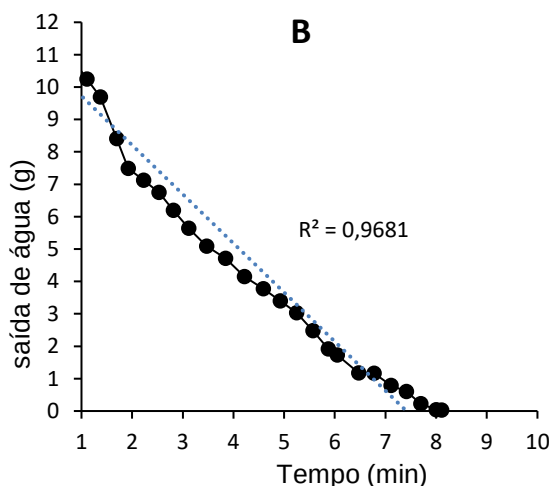
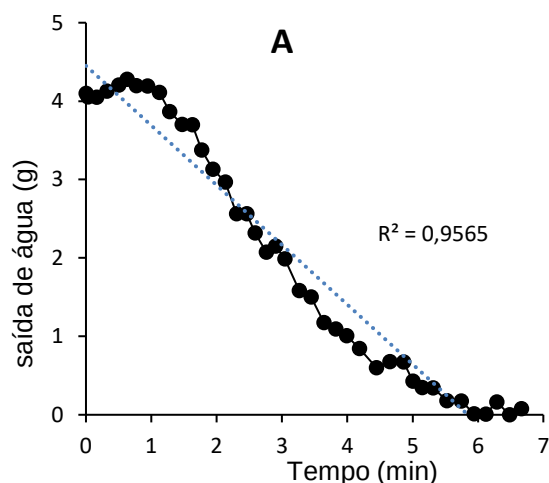
Amostra	Argila (%)	Silte (%)	Areia (%)	LL (%)	LP (%)	IP (%)	Classificação SUCS
Solo 1	11	4	85	N.L	N.P	-	Areia siltosa (SM)
Solo 2	32	25	43	22,5	19,57	2,93	Silte de baixa compressibilidade (ML)
Solo 3	32	10	58	39,5	27,43	12,07	Areia siltosa (SM)
Solo 4	42	10	48	29,2	26,86	2,34	Silte de baixa compressibilidade (ML)

Os resultados, sobre a determinação do teor de umidade encontrados para as diferentes amostras de solos classificados texturalmente utilizando a metodologia do forno micro-ondas estão apresentados na Figura 10. Verifica-se, conforme o coeficiente de regressão linear obtido, que o perfil de saída de água ao longo do tempo obedece a um comportamento razoavelmente previsível, contudo, observa-se que o comportamento da variação do perfil de saída de água diferiu em função da classe textural do solo.

Para amostra de areia siltosa, - Figura 10 (A), verifica-se, que no início do processo, houve um ligeiro aumento da curva, ou seja, uma maior absorção de água do meio, até atingir a temperatura ideal para ocorrer o linear de distorção (desidratação), percebe-se também, o mesmo

comportamento para amostra da figura 10 (C), porém de menor atuação. Pode-se inferir que este comportamento, deve-se em um primeiro momento ao aumento da temperatura em função da presença da sílica presente neste tipo de solo, o que possibilita esta variação do aumento do peso da amostra no início do processo.

Por outro lado, com relação às amostras da figura 10 (B e D), sendo ambas do tipo silte, observa-se uma maior ou menor concavidade da curva para baixo com relação à reta de tendência obtida. Esta variação pode também nos dá uma percepção de um possível padrão de comportamento da curva de redução de umidade acerca das características dos solos e seus componentes, o que sugeri um maior estudo.



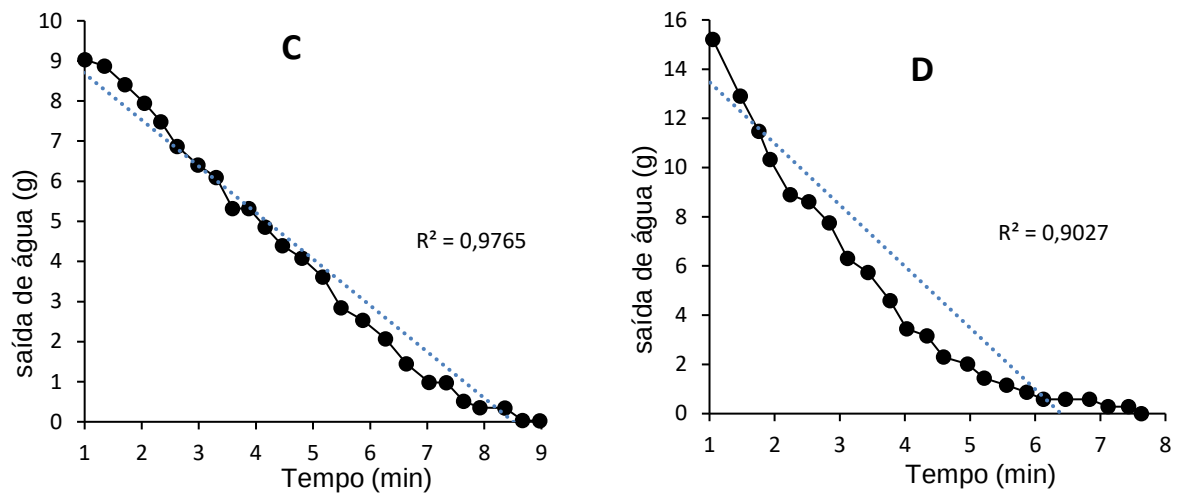


Figura 10. Curva de saída de água das amostras: solo 1 (SM) – (A), solo 2 (ML) – (B), solo 3(SM) – (C), solo 4 (ML) – (D).

Com relação a comparação dos métodos de secagem de micro-ondas e estufa, verifica-se, que as amostras de solo areia siltosa (solo 1) e a mostra de solo silte de baixa compressibilidade (solo 4), não diferiram estatisticamente ($P>0,05$), mantendo uma precisão semelhante ao do método padrão da estufa. Contudo, as amostras de silte de baixa compressibilidade (solo 2) e areia siltosa (solo 3), demonstraram uma pequena variação. Os resultados encontrados para os valores percentuais do teor de umidade, o tempo duração do processo, e o desvio padrão dos experimentos, estão apresentados na tabela 2.

Quanto as análises para detecção de variações residuais nos ensaios gravimétricos das amostras, obtidas a parti do pós-processamento pelo método da estufa, os resultados indicam que os traços de umidade nas amostras processadas pelo sistema proposto foram praticamente insignificantes (Tabela 3). Verifica-se, com isto, que o forno de micro-ondas pode retirar a umidade do solo em análise, e neste caso, a pequena flutuação apresentada pode indicar apenas um provável ganho de umidade adquirido no traslado da amostra e manuseio externo de pesagem.

Tabela 2. Análise do percentual do teor de umidade entre os métodos de micro-ondas e estufa

Amostra de solo	Teor de umidade (%)		Tempo (min)		desv. P	
	micro-ondas	estufa	micro-ondas	estufa	micro-ondas	Estufa
Solo 1 - SM	8.23 a	8.15 a	06:18	1440	0.027	0.033
Solo 2 - ML	18.62 c	17.73 b	10:15	1440	0.006	0.338
Solo 3 - SM	18.15 bc	19.42 e	09:12	1440	0.171	0.064
Solo 4 - ML	29.99 d	30.34 d	08:09	1440	0.504	0.176

* Letras iguais não diferem estatisticamente pelo teste ANOVA de Tukey ao nível de 5%

Tabela 3. Comparação dos valores medidos pelos dois métodos e a flutuação dos resíduos do método forno de micro-ondas

Amostra	Teor de umidade (%)		Residual estufa/micro-ondas
	micro-ondas	Estufa	
Solo 1 – SM	8.41	8.45	0.04
Solo 2 – ML	18.32	18.69	0.37
Solo 3 – SM	13.87	13.86	- 0.01
Solo 4 – ML	38.4	38.33	- 0.07

Discussão

A eficiência do método para análise do teor de umidade por forno micro-ondas, também foi demonstrado por Santos & Silva (2019), apresentando um erro médio de 0,48% nos valores de secagem de amostras de solo, e indicou que o método de micro-ondas possui precisão similar aos valores de secagem do método de estufa, e a incompatibilidade apresentada está dentro do nível de tolerância aceitável. Destaca-se ainda que as vantagens deste tipo de aquecimento é a velocidade da transferência do calor, além da obtenção do controle durante o processo.

Contudo, de acordo com Chung et al., (2008), o uso efetivo de um forno de micro-ondas para medição do teor de umidade depende de vários fatores inter-relacionados, como: composição mineral, calor específico, densidade dos materiais, tamanho da amostra, recipientes usados, quantidade de amostras por testes, e por isso, a precisão dos resultados da análise podem variar. Além disso, de acordo com Cordeiro et al., (2022), a principal objeção ao uso do forno de micro-ondas para determinação do teor de umidade tem sido a possibilidade de superaquecimento do solo, sendo recomendado encontrar um equilíbrio entre velocidade de secagem ideal e o ajuste de potência de micro-ondas. Assim, para alguns tipos de solo, como os que contêm quantidades significativas de matéria orgânica e minerais ou outros materiais hidratados, este método pode não fornecer valores confiáveis de conteúdo de água devido ao potencial de aquecimento acima de 110°C, ou falta de meios para contabilizar a presença de sólidos precipitados que foram previamente dissolvidos (Kaczmarek et al., 2022; Kramarenko et al., 2016).

Uma das principais características do forno de micro-ondas é que excita as moléculas, faz com que vibrem e aqueçam de dentro para fora. De acordo (Araújo, 2015), para a faixa de frequência de operação do micro-ondas para o aquecimento das amostras existem dois mecanismos que atuam para conversão de energia eletromagnética em energia térmica, os quais são: a) a condutividade elétrica, e; b) a relaxação dos dipolos elétricos. Este fenômeno acontece para toda uma faixa de frequência e não requer uma frequência de ressonância para acontecer, até porque a frequência de ressonância de água é acima de 1 THZ, enquanto a frequência do forno de micro-ondas é de 2,45 GHz. Desta forma, as micro-ondas provocam rotação das moléculas de água, que ao girar as moléculas e elas se atritam produzindo e transferindo energia aumentando a sua agitação.

Essa é a transferência de energia que resulta no aquecimento do alimento ou do material (geológico). O fenômeno não é exclusivo da água e pode acontecer com outras moléculas que apresentam momento de dipolo elétrico semelhantes, porém de maneira menos pronunciada (Thamer et al., 2021).

Em um estudo realizado por Cormick (2015), utilizando 192 amostras contendo solos siltosos e argilosos, demonstrou que a diferença entre os métodos de micro-ondas e estufa, foi inferior a 1,5% em mais de 98% dessas amostras e com mais de 90% das amostras tendo uma diferença de menos de 1%. O estudo concluiu que o método do forno de micro-ondas não era adequado para uso em teores de umidade acima de 110% ou com solo contendo mais de 10% de matéria orgânica (musgo de turfa). Todos os outros materiais testados mostraram uma boa correlação entre os teores de umidade testados até o limite líquido dos materiais sendo adequado para uso como um método de secagem por micro-ondas.

No que diz respeito ao aspecto básico que é o tempo de secagem, em estudo realizado por JASTRZEBSKA, (2019), verificou que no forno de micro-ondas, os solos coesivos (abundante composição em sílica) secam mais rápido do que os solos não coesivos. Isso pode ser explicado pelo mecanismo de secagem “por dentro” no caso da energia de micro-ondas. Além disso, em solos coesivos, a água está mais relacionada aos cristais de argila e é por isso que o aquecimento do interior e as vibrações resultantes das partículas provocam uma liberação mais rápida da água e secagem da amostra. Contudo, sobre este fenômeno, Prokopowicz et al., (2020), ressaltam que em solos coesivos, não há tendência regular e o tempo de secagem depende da umidade da amostra e da granulação do solo. Portanto, recomenda-se aquecer solos coesivos por pelo menos 10 minutos, solos não coesivos por até 20 minutos (ou mais) e observar os resultados em comparação com os resultados após a secagem por estufa 24 horas e ajustar assim o tempo de aquecimento no forno de micro-ondas individualmente dependendo da granulação e umidade estimada da amostra.

Em estudo preliminar, conforme a metodologia descrita por Quintino et al. (2015) e Jalilian et al., (2017), empregado diferentes tipos de solos com uma composição variada de areia, silte e argila, foram identificados os tempos de 10 a 20 minutos e a potência 508 a 600 watts como parâmetros ideais para a maioria dos solos. Em particular, este valor se refere a 60% da potência

nominal do forno de micro-ondas utilizado para o processo.

Conclusão

Conforme demonstrado pelos resultados obtidos no processo de determinação do teor umidade do solo por este sistema, pode-se demonstrar contribuições únicas no concernente à redução do tempo de análise e além de estabelecer um processo automatizado. Como pontos de particular importância ressalta-se:

1. O sistema desenvolvido neste projeto distingue-se dos demais métodos de secagem por forno micro-ondas, já descritos na literatura, em função das adaptações para a automação do processo de medição de teor de umidade, estabelecendo um sistema rápido e de baixo custo para uso tanto em laboratório como em campo.

2. As medições utilizadas para a calibração da célula de carga, para encontrar um menor índice de ruído nas leituras, foi observado com base na distribuição da gaussiana, verificando-se que o sistema de medição desenvolvido é preciso e confiável.

3. Os ensaios sobre a determinação do teor de umidade de solo foram capazes de traçar curvas dos padrões de evaporação da água do solo sob análise.

4. As observações sobre análise da curva de variação da umidade obtidas durante o processo de desumidificação demonstrou que o comportamento das amostras diferiu em função da classe textural do solo. Assim, posteriores estudos devem ser realizados com intuito de averiguar esta relação que pode ser usadas como “assinaturas” do tipo e características do solo sob análise vindo acrescentar informações relevantes as áreas de geociências.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco (IFPE), pelo uso dos espaços e infraestrutura ofertados nos Laboratórios de Construção Civil (LCC) e no Laboratório de Desenvolvimento e Extensão de Tecnologia Eletrônica e Robótica (DEXTER) do Grupo de Pesquisa de Sistemas Embarcados e Redes de Sensores (GPSERS). A Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) pelo uso dos laboratórios do Grupo de Engenharia Geotécnica de desastres e Planícies GEGEP.

Referências

- ABNT. 2012. Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 16097: Solo – Determinação do Teor de Umidade – Métodos Expeditos de ensaio. Rio de Janeiro.
- Alrazaaq, S. N. A. 2016. LabVIEW Based Fuzzy Controller Designed for a Microwave Oven. *Tikrit Journal of Engineering Sciences*, 23(1), 61–68.
- Ansari, S., & Deshmukh, R. R. 2017. Estimation of Soil Moisture Content--A Review. *International Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 12(3), 571–577. Retrieved from <http://www.ripublication.com>
- Araújo, M. M. de. 2015. Caracterização de um Modelo Numérico Utilizando Fdtd para uso em Processos de Aquecimento por Micro-ondas em Cavidades Multimodo. Universidade Federal Rural do Semi-Árido.
- Arezou, R., Maria, P., & Mehrdad, R. 2020. Assessment of Soil Moisture Content Measurement Methods: Conventional Laboratory Oven versus Halogen Moisture Analyzer. *Journal of Soil and Water Science*, 4(1), 151–160. doi: 10.36959/624/440
- Brocca, L., Ciabatta, L., Massari, C., Camici, S., & Tarpanelli, A. 2017. Soil Moisture for Hydrological Applications: Open Questions and New Opportunities. *Water (Switzerland)*, 9(2). doi: 10.3390/w9020140
- Casagrande, A. 1948. Classification and Identification of Soils. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 113(1), 901–930. doi: <https://doi.org/10.1061/TACEAT.0006109>
- Chung, P. W., & Ho, T. Y. 2008. Study on the Determination of Moisture Content of Soils by Microwave Oven Method. *Geotechnical Engineering Office, Civil Engineering and Development Department*.
- Coelho, K. D. S. 2022. Determinação da Matéria Seca de Alimentos Volumosos Úmidos em Estufa e em Micro-ondas. Monografia, Universidade Federal de Uberlândia.
- Cordeiro, J. S., Eloi, D. M., Araújo, S., Brito, H., & Da Luz, J. A. M. 2022. Microwave Aquametry According to ASTM D4643-17 for Moisture Determination in Iron ore Tailings / Aquametry de Microondas de acordo com a ASTM D4643-17 para Determinação da

- Humidade em Rejeitos de Minério de Ferro. *Brazilian Journal of Development*, 8(1), 5673–5686. doi: 10.34117/bjdv8n1-384
- Cormick, A. 2015. Comparing Different Heating Methods for Determination of Moisture Content in Soils (Issue October) [University of Southern Queensland Faculty]. Retrieved from <https://eprints.usq.edu.au/29189>
- Cremon, C., Longo, L., Mapeli, N. C., Silva, L. A. M., & Silva, W. M. da. 2014. Determinação da Umidade de Diferentes Solos do Pantanal Matogrossense via Micro-ondas e Método Padrão. *Revista Agrarian*, 7(24), 280–288.
- de Lima Pereira, F. A., de Medeiros, J. F., da Silva Dias, N., da Silva Sá, F. V., de Lima Silva, S., & Neto, M. F. 2021. Desenvolvimento de Sensor de Umidade do Solo Utilizando o Princípio da Resistência Elétrica. *Irriga*, 26(1), 29–41.
- De Oliveira, L. F. C., & Roque, C. G. 2016. Determinação Da Umidade Do Solo Por Micro-Ondas E Estufa Em Três Texturas De Um Latossolo Vermelho-Amarelo Do Cerrado. *Journal of Neotropical Agriculture*, 3(4), 60–64. doi: 10.32404/rean.v3i4.1163
- Dos Santos, S. L. M., & Da Silva Filho, E. P. 2019. Determinação da Umidade de Solo pelos Métodos Estufa e Forno Micro-Ondas em Diferentes Texturas de um Latossolo Vermelho-Amarelo Sul-Amazônico. *Geografia (Londrina)*, 28(2), 41. doi: 10.5433/2447-1747.2019v28n2p41
- Gaspard, K. 2022. Rapid Drying Soils with Microwave Ovens. Louisiana Transportation Research Center. Retrieved from www.vulcanhammer.org
- Gomes, R. M. S., Faria, L. F. ., & Sarmiento, A. P. 2022. Determinação da Umidade de um Solo Franco Arenoso por Diferentes Métodos de Ensaio. *Revista Brasileira de Engenharia e Sustentabilidade*, 10(1), 16–27.
- Jalilian, J., Moghaddam, S. S., & Tagizadeh, Y. 2017. Accelerating Soil Moisture Determination with Microwave Oven. *Journal of Chinese Soil and Water Conservation*, 48(2), 101–103.
- JASTRZEBSKA, M. 2019. Practical Application of the Microwave Oven in the Geotechnical Laboratory. *Architecture, Civil Engineering, Environment*, 12(2), 91–104. doi: 10.21307/acee-2019-026
- Kaczmarek, Ł., Jastrzębska, M., & Wejrzanowski, T. 2022. The Impact of Microwave Drying on the Structure of Exemplary Soils—Insights Using X-ray Microtomography. *Materials*, 15(17), 1–14. doi: 10.3390/ma15175891
- Kalnar, Y., Balakrishnan, R., Mann, S., Bidyalakshmi, T., Dawange, S., & Indore., N. 2018. Microcontrollers and Sensors in Post-harvest Application of Agricultural Commodity's Sorting/ Grading and Storage. 197–202. Retrieved from <https://krishi.icar.gov.in/jspui/handle/123456789/13894>
- Kramarenko, V. V., Nikitenkov, A. N., Molokov, V. Y., Shramok, A. V., & Pozdeeva, G. P. 2016. Application of Microwave Method for Moisture Determination of Organic and Organic-mineral Soils. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 33(1). doi: 10.1088/1755-1315/33/1/012040
- Miller, R. J., Smith, R. B., & Biggar, J. W. 1974. Soil Water Content: Microwave Oven Method. *Soil Science Society of America Journal*, 38(3), 535–537. doi: 10.2136/sssaj1974.03615995003800030042x
- Mohamad, H. M., Adnan, Z., Razali, S. N. M., & Zolkefle, S. N. A. 2020. Assessment for Applicability of Microwave Oven in Rapid Determination of Moisture Content in Peat Soil. *Journal of Engineering Science and Technology*, 15(3), 2110–2118.
- Monteiro, R. L., Gomide, A. I., Link, J. V., Carciofi, B. A., & Laurindo, J. B. 2020. Microwave Vacuum Frying of foods with Temperature Control by Power Modulation. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 65, 102473.
- Passos, M. N. S., Oliveira, A. M. de, & Gomes, A. K. F. 2019. Aplicações das equações de maxwell. *Revista Acadêmica - Ensino de Ciências e Tecnologias IFSP*, 4(4), 260–273.
- Prokopowicz, P., Pires, P., Michałek, A., Rybak, A., & Khairutdinov, A. M. 2020. Time Necessary for Microwave Drying of Mineral Soils. *Journal of Physics: Conference Series*, 1614(1). doi: 10.1088/1742-6596/1614/1/012021
- Quintino, A. da C., Andrade, P. de J., Silva, T. J. da, & Caneppele, M. A. 2015. Métodos de Determinação de Umidade nos Solos de Cerrado. *Enciclopédia Biosfera*, 151, 10–17. doi: 10.1145/3132847.3132886
- Ribeiro, K. M., Castro, M. H. de C., Ribeiro, K. D., Lima, P. L. T., Abreu, L. H. P., & Barros, K. L. C. 2018. Estudo Comparativo do Método Padrão da Estufa e do Método Speedy na Determinação do Teor de Água no Solo. *Brazilian Journal of Biosystems Engineering*, 12(1), 18–28.

- Rodrigues, M. G. A. 2017. Determinação da Umidade do Solo por Meio do Forno Micro-ondas. Faculdade de Ciências Gerenciais de Manhuaçu.
- Sagayaraj, A. S., Kabilesh, S. K., Mohanapriya, D., & Anandkumar, A. 2021. Determination of Soil Moisture Content Using Image Processing-A Survey. Proceedings of the 6th International Conference on Inventive Computation Technologies, ICICT 2021, January, 1101–1106. doi: 10.1109/ICICT50816.2021.9358736
- Salas, F. B. F., Gandra, M. de A., & Beretequini, A. B. T. 2018. Controle de Compactação do Solo. *Revista Engenharia Em Ação UniToledo*, 3(1), 130–146.
- Santos, S. L. M. dos, & Filho, E. P. da S. 2019. Determinação da umidade de solo pelos Métodos Estufa e Forno Micro-Ondas em Diferentes Texturas de um Latossolo Vermelho-Amarelo Sul-Amazônico. *Geografia (Londrina)*, 28(2), 41. doi: 10.5433/2447-1747.2019v28n2p41
- Shamir, O., Goldshleger, N., Basson, U., & Reshef, M. 2018. Laboratory measurements of subsurface spatial moisture content by ground-penetrating radar (GPR) diffraction and reflection imaging of agricultural soils. *Remote Sensing*, 10(10). doi: 10.3390/rs10101667
- Silva, E. A., Antônio, P., & Benevenuto, N. 2021. Influência da Textura e Mineralogia na Determinação da Umidade de Solos Utilizando Micro-ondas. *Revista Engenharia de Interesse Social*, 6(7), 90–101. Retrieved from <http://revista.uemg.br/index.php/reis/index>
- Thamer, F. A., Al-wakeel, H. B., Mohammadridha, T., & Ibraheem, Z. T. 2021. An Overview on a Technique to Measure and Control of the Electromagnetic Radiation Inside a Microwave Oven. *Iraqi Journal of Computer, Communication, Control and System Engineering*, 38–52. doi: 10.33103/uot.ijccce.21.1.4
- Usmen, M. A., & Yan Kheng, H. 1986. Use of Microwave Oven for Rapid Determination of Moisture Content of Highway Materials. *Transportation Research Record*, 68–75.
- Younis, S. M. Z., & Iqbal, J. 2015. Estimation of Soil Moisture Using Multispectral and FTIR Techniques. *Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 18(2), 151–161. doi: 10.1016/j.ejrs.2015.10.001
- Yu, L., Gao, W., Shamshiri, R. R., Tao, S., Ren, Y., Zhang, Y., & Su, G. 2021. Review of Research Progress on Soil Moisture Sensor Technology. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 14(4), 32–42. doi: 10.25165/j.ijabe.20211404.6404
- Zolini, G. N., Costa, T. R., Costa Nobre, D. A. da, & Silva, R. S. da. 2022. Eficiência do uso de Micro-ondas para Determinação de Umidade em Grãos de Soja (*Glycine max* (L.) Merr.): Uso na Radiação Não-ionizante na Agricultura. *Diversitas Journal*, 7(1), 0071–0081. doi: 10.48017/dj.v7i1.1713