



# RBES

Revista Brasileira de  
Engenharia e Sustentabilidade

ISSN 2448-1661

Pelotas, RS, UFPel-Ceng

<https://periodicos.ufpel.edu.br/ojs2/index.php/RBES/index>

**v.10, n.1, p.30-41, jul. 2022**

## DETERMINAÇÃO DA UMIDADE DE UM SOLO FRANCO ARENOSO POR DIFERENTES MÉTODOS DE ENSAIO

GOMES, R. M. S.<sup>1</sup>; FARIA, L. F. D.<sup>2</sup>; SARMENTO, A. P.<sup>3</sup>;

<sup>1</sup>Mestranda - Programa de Pós Graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília (UnB). E-mail: raislagomess@gmail.com

<sup>2</sup>Pós-graduanda - Gerenciamento de Obras, Produtividade e Tecnologia da Construção - Instituto de Pós Graduação e Graduação (IPOG).

<sup>3</sup>Professor - Faculdade de Engenharia - Universidade Federal de Catalão (UFCAT).

**Palavras-chave:** Estufa; Micro-ondas; Teste speedy; Frigideira; Alta frequência.

### Resumo

No estudo acerca das diferentes condições em que o solo se encontra, o teor de umidade é um parâmetro que permite conhecer melhor o seu comportamento, além de ser de extrema importância na execução de projetos de fundações, aterros, pavimentação e afins. Dada essa relevância, o objetivo deste trabalho foi analisar os resultados de umidade do solo aplicando-se diferentes métodos de ensaio: estufa (padrão), micro-ondas, frigideira sem areia, frigideira com areia na base, teste speedy e medidor portátil de alta frequência. A verificação de igualdade entre os métodos alternativos e o método padrão, antes e após calibração, ocorreu pelo teste de Dunnett. As curvas de calibração dos métodos alternativos em relação ao método padrão foram geradas utilizando-se regressão linear. Diante da análise dos resultados, concluiu-se que os métodos do micro-ondas, speedy e frigideira com areia apresentaram respostas satisfatórias, o medidor portátil de alta frequência distanciou-se do método padrão e o método da frigideira sem areia, apresentou respostas distintas e dependentes da faixa de umidade analisada.

## MOISTURE DETERMINATION OF A SANDY LOAM SOIL BY DIFFERENT METHODS

**Keywords:** Drying oven; Microwave oven; Speedy moisture test; Frying pan; High frequency.

### Abstract

In the study about the different conditions in which the soil is found, the moisture is a parameter that allows to know better its behavior, besides being of extreme importance in the execution of projects of foundations, landfills, paving, irrigation and others. Given this relevance, a study was carried out at the Geotechnical Laboratory of the Federal University of Catalão, with the objective of analyzing the results obtained by applying different methods of soil moisture tests, oven-drying method (standard), microwave, frying pan with and without sand, speedy test, and high frequency portable meter. The data analyzes were performed through the Tukey statistical study and also through the calibration curves of the alternative methods in relation to the standard method. In this study, soil characterization tests were also carried out, since the soil type can influence the soil moisture behavior, so it was possible to classify it as a sandy loam soil. In the analysis of the results, it was concluded that microwave, speedy test and frying pan with sand presented satisfactory answers, the high frequency portable meter was distanced from the standard method, the frying pan without sand presented different responses depending on the moisture content.

## INTRODUÇÃO

O solo pode ser considerado um dos elementos fundamentais para as atividades humanas, principalmente para as engenharias, por se tratar do suporte físico da construção de residências, estradas, aterros, pontes, barragens, entre outros (LIMA, 2007).

A importância da obtenção da umidade do solo para aplicações hidrológicas, geotécnicas, ambientais e agrícolas, foi reconhecida a algum tempo, visto que novos métodos de obtenção desse parâmetro vêm sendo estudados e normatizados com o intuito de garantir técnicas confiáveis e rápidas para obtenção do teor de umidade (WALKER; WILLGOOSE; KALMA, 2004). A aplicabilidade e confiança dos diferentes métodos, laboratoriais e in situ, em diferentes tipos de solo, ainda é alvo de constantes discussões e necessidade de estudo (LEKSHMI; SINGH; BAGHINI, 2014).

Tomando como exemplo aplicações geotécnicas, a umidade do solo influencia diretamente na resistência do mesmo quando esse é compactado (MELLO; TEIXEIRA, 1962). Para a compactação dos solos são geradas curvas de compactação que, para uma determinada energia de compactação, relacionam o peso específico com a umidade, buscando-se a umidade ótima, quando o peso específico aparente é máximo, contudo, o índice de resistência do solo decresce quando se aumenta o teor de umidade, de tal forma é muito importante o controle constante da umidade durante a execução das obras (CAPUTO, 1996).

No Brasil, o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) é referência no controle de qualidade de projeto e execução de obras do sistema federal de viação, e por isso, as normas elaboradas pelo mesmo sempre enfatizam a importância desse controle. Além disso, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) também é responsável por elaborar normas que regem a execução de ensaios nesse âmbito. Porém, quando não há especificações de normas brasileiras, principalmente para métodos de ensaio empíricos, é comum aplicar os procedimentos trazidos pela American Society for Testing and Materials (ASTM).

Camargo e Costa (1960), Ghelfi Filho (1988), Braga et al. (2009), Berney IV, Kyzar e Oyelam (2011) e Sebesta et al. (2013) realizaram estudos

comparativos entre diversos métodos de obtenção da umidade, e para os mesmos métodos foram observadas conclusões diferentes, que podem ser justificadas pelo tipo de solo, características físico-químicas dos solos, tipo de equipamento, modo de realizar a calibração entre outros. Dessa forma, justifica-se a realização de novos trabalhos visando entender melhor a relação e aplicabilidade dos métodos padrão e alternativos para garantir mais agilidade aos ensaios e ao mesmo tempo confiança nas determinações realizadas.

O objetivo deste artigo é comparar estatisticamente os diferentes métodos alternativos de obtenção da umidade perante o método padrão, considerando sua determinação direta, gerar curvas de calibração para cada método alternativo e comparar as determinações calibradas com o método padrão.

## MATERIAL E MÉTODOS

### Caracterização do solo utilizado

O solo utilizado neste estudo foi obtido no Campus 1 da Universidade Federal de Catalão (UFCAT), localizado na Cidade de Catalão - Goiás. A preparação da amostra de solo foi realizada de acordo com os quesitos estabelecidos na NBR 6457 (ABNT, 2016).

Realizaram-se os ensaios de caracterização do solo com o intuito de obter parâmetros relacionados aos limites de consistência (NBR 6459 (ABNT, 2016) e NBR 7180 (ABNT, 2016)), curva granulométrica (NBR 7181 (ABNT, 2016)), massa específica (NBR 6508 (ABNT, 1984)) e teor de matéria orgânica (NBR 13600 (ABNT, 1996)), uma vez que essas características influenciam de forma direta nas respostas de umidade do solo. Após a realização dos ensaios de caracterização, foram realizados os ensaios de umidade utilizando as metodologias propostas neste trabalho (estufa, micro-ondas, teste speedy, frigideira sem areia, frigideira com areia e alta frequência).

### Preparação das amostras para realização dos ensaios de umidade

Para cada bateria de ensaio foram separadas 400 g de solo a fim de prever o incremento de água empregado a cada ponto de umidade analisado. Como pontos de umidade teórica de preparação (UTP), optou-se por utilizar os seguintes valores de umidade: 5, 10, 15,

20 e 25%. Esses valores atendem as especificações de umidade mínima e máxima dos métodos e aparelhos utilizados, além de serem umidades em que o tipo de solo do estudo se comportava de maneira adequada para realização dos ensaios. Sendo assim, foi possível calcular os valores da massa de água adicionados a cada amostra e relativos a cada porcentagem de umidade.

Após o acréscimo de água, a amostra foi homogeneizada durante 10 minutos, com o auxílio de espátulas, a fim de garantir que toda massa fosse umedecida uniformemente. Com a amostra homogeneizada e úmida, foram separadas porções menores destinadas à realização dos ensaios da estufa – EST (padrão), teste speedy (SPE), micro-ondas (MIC), frigideira com areia (FCA), frigideira sem areia (FSA) e medidor portátil de alta frequência (MPAF). Para cada valor de UTP foram feitas trélicas das amostras, totalizando em 90 ensaios de umidade.

### **Método da estufa (padrão) - EST**

O método da estufa é normatizado pela Norma Rodoviária 213 do DNER (1994a). Conforme a EMBRAPA (1997), dentre os métodos de determinação de umidade, esse é considerado o método de referência.

No método padrão da estufa, para cada bateria de ensaio, foram tomadas 30 g de solo, das 400 g preparadas para cada ponto de umidade. Essa amostra foi colocada em cadinho de porcelana e levado à estufa por um período de 24 horas em temperatura  $105 \pm 5^\circ\text{C}$ . Com o peso do solo seco e o peso do solo úmido foi possível calcular a umidade do solo.

### **Método do micro-ondas - MIC**

A obtenção da umidade por meio do aparelho micro-ondas é normatizada pela Norma D-4643 (ASTM, 2000) e foi utilizada como referência para a execução desse ensaio.

Inicialmente o micro-ondas foi calibrado conforme recomendações do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA, 2002). Foram utilizadas 40 g de solo úmido para realização dos ensaios, que de acordo com Cremon et al. (2014), tal valor foi o que melhor apresentou efeito de secagem quando aquecido no micro-ondas.

Assim, das 400 g da amostra homogeneizada, foram pesadas 40 g de solo úmido em um cadinho

de porcelana destinado ao aquecimento inicial de 3 minutos. Após o término do primeiro aquecimento, a amostra foi retirada do micro-ondas e reservada para que esfriasse de maneira que não recebesse umidade do ambiente externo.

Depois de fria a amostra foi pesada novamente e o novo valor do peso do solo seco foi anotado. Na sequência, a amostra foi levada ao micro-ondas novamente por mais 1 minuto. Após esse tempo, a amostra ficava reservada até que estivesse fria e pudesse ser pesada. Esse processo de aquecimento por 1 minuto, retirada, esfriamento e pesagem do solo seco se repetiu até que houvesse constância de massa nas últimas três.

### **Método Speedy - SPD**

A determinação da umidade pelo método speedy é regida pela Norma Rodoviária 052 do DNER (1994b), sendo esse ensaio muito utilizado em campo devido a sua praticidade.

O início do ensaio se deu por meio da pesagem da massa de solo conforme a UTP que estava sendo ensaiada. No caso do teste speedy a massa ensaiada é variável nos diferentes intervalos de umidade, conforme manual do equipamento, sendo 12 g para umidade até 11%, 6 g para umidade entre 12 e 22% e 3 g para intervalo entre 23 e 44%. Assim, com a própria balança fornecida no conjunto do equipamento foram pesadas as amostras úmidas e posteriormente, dentro do equipamento foram dispostas a ampola de carbureto de cálcio, as duas esferas metálicas e o solo, de maneira que fosse garantido o rompimento da cápsula no momento da agitação.

Com o equipamento bem vedado, o conjunto foi agitado vigorosamente durante um minuto, a fim de garantir que todo conteúdo da ampola de carbureto de cálcio reagisse com a água da amostra e após esse tempo foram feitas as leituras no manômetro.

### **Método da frigideira sem areia - FSA**

Para o método expedito da frigideira foi adotada a Norma Americana D-4959 (ASTM, 2016). Inicialmente foram pesadas 100 g de solo úmido na frigideira, quantidade essa obtida por meio do no Manual de Ensaios do Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem do Estado do Rio Grande do Sul (DAER-RS, 2001), e posteriormente o conjunto foi

levado ao fogareiro com chama baixa/média a fim de aquecer a amostra e retirar toda água.

O primeiro tempo de parada do ensaio ocorreu quando, com o auxílio de uma placa de vidro colocada sobre a frigideira, não foi mais possível perceber a perda de água. Sendo assim, esse tempo foi variável para cada umidade ensaiada e cada amostra. Destaca-se que neste trabalho também foram obtidos os valores de umidades determinados no tempo inicial do ensaio da frigideira denominado de FSA0, uma vez que em campo muitas vezes, os ensaios não são continuados até que haja a constância de massa.

Continuou-se o ensaio, levando-se o conjunto (frigideira + solo seco) para a bancada com a finalidade de esfriar e realizar a pesagem, posteriormente levou-se ao fogareiro por mais 2 minutos. Esse tempo foi fixado visto que se notou que no reaquecimento da frigideira não havia mais perda de água, e com isso o aquecimento foi cessado e a frigideira foi levada novamente para esfriar. A opção pela fixação do tempo para reaquecimento foi baseada na Norma D-4643 (ASTM, 2000), que fixa o tempo de reaquecimento para o micro-ondas. Sendo assim, esse padrão também foi utilizado no método FSA, tendo em vista que não existe normativa específica até o momento. O processo, de reaquecimento, esfriamento e pesagem foi repetido até que houvesse constância de massa.

### **Método frigideira com areia - FCA**

O método expedito da frigideira com areia é também chamado de método banho de areia (ALMEIDA, 2005; VIERIA, 2009). Para esse ensaio, a massa de 100 g de solo foi obtida analogamente ao método da frigideira sem areia, retirada dos 400 g iniciais e foi pesada em um cadinho que posteriormente foi colocado para aquecer na frigideira com uma camada de areia. Essa areia foi distribuída a fim de envolver todo cadinho e garantir uma distribuição de calor uniforme. A chama utilizada foi baixa/média e em todos os ensaios sempre houve a preocupação de mantê-la constante.

O primeiro tempo de parada se dava quando não era mais possível perceber vapor na placa de vidro colocada sobre a frigideira. Assim, o cadinho foi retirado e levado para bancada até que estivesse frio para ser pesado. O cadinho novamente foi colocado no frigideira e aquecido por 3 minutos. Esse tempo

foi fixado da mesma forma que para o método FSA, porém notou-se que foi necessário um tempo maior para que não houvesse a perda de água, sendo esse tempo de 3 minutos.

Esse processo foi feito com o intuito de assegurar que toda água fosse removida e o ponto de parada ocorreu quando as três últimas massas pesadas do conjunto solo mais cadinho permaneceram constantes.

### **Medidor Portátil de Alta Frequência (MPAF)**

Inicialmente foi feita a calibração do MPAF, da marca Biopoint (2014), para o solo desta pesquisa conforme recomendações do manual do equipamento. O solo estudado com diferentes umidades foi colocado no aparelho e por meio das medições dessas umidades, o equipamento gera uma curva de calibração. Assim, com o aparelho calibrado, dos 400 g da amostra inicial foi tomada uma quantidade suficiente para preencher todo o espaço disponível na célula de teste.

Com o equipamento devidamente preenchido e vedado, escolhia-se a escala de medição, e após cerca de dez segundos foi fornecida a umidade encontrada juntamente com temperatura da amostra.

### **Análises estatísticas**

Neste trabalho foram aplicadas duas análises estatísticas distintas. A regressão linear foi aplicada com o intuito de ajustar os dados obtidos através dos métodos alternativos e com isso obter as curvas de calibração. A significância dos coeficientes das curvas de calibração (intercepto e inclinação) foi analisada pelo teste t, e a significância da regressão pelo teste F. Obteve-se para cada curva de calibração o coeficiente de determinação ajustado ( $R^2_{aj}$ ) e o erro padrão residual (EPR).

Também se aplicou o teste de comparação de médias de Dunnett, com o intuito de averiguar se existe diferença significativa entre as médias do tratamento controle (EST) perante os métodos alternativos. As análises estatísticas foram realizadas utilizando-se o programa R (R CORE TEAM, 2021).

### **Ensaio de verificação das curvas de calibração**

O processo de verificação desta pesquisa foi realizado de duas maneiras distintas, uma realizando

os ensaios com o solo retirado diretamente do mesmo local de extração inicial e sem nenhuma preparação prévia, com o intuito de aproximar da realização dos ensaios em campo; e outra executada da mesma maneira conforme descrito na etapa de materiais e métodos, com preparação prévia, adição de água (nesse caso aleatoriamente) e homogeneização da amostra.

Estes ensaios foram realizados em trélicas, diferindo dos ensaios anteriores apenas no que tange a porcentagem de umidade do solo, uma vez que para a verificação das curvas de calibração não foram previamente definidas.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Resultados dos ensaios de caracterização e classificação do solo

Na Tabela 1 está apresentado um resumo com os ensaios de caracterização e classificação do solo utilizado na pesquisa.

Tabela 1. Caracterização e classificação do solo que foi utilizado na pesquisa

Ensaio	
Massa específica dos grãos (g/cm <sup>3</sup> )	2,707
Teor de matéria orgânica (%)	7,36
Limite de liquidez (%)	28,84
Limite de plasticidade (%)	15,83
Índice de plasticidade (%)	13,84
Granulometria	
Pedregulho (%)	0,99
Areia (%)	72,53
Silte (%)	14,44
Argila (%)	12,03
Classificação	
EMBRAPA	Textura franco arenosa
SUCS	Grupo CL - Argilas inorgânicas de baixa a média plasticidade
AASHTO	Grupo A6 - Solo argiloso fraco

adaptado aos diversos tipos de solos encontrados no Brasil.

### Resultados dos ensaios de umidade

Na Tabela 2 estão apresentados os dados obtidos dos ensaios de umidade do solo realizados para os diferentes métodos de determinação sem o uso das curvas de calibração. Observa-se na Tabela 2 que os valores de umidade obtidos pelo método FCA foram

De posse dos resultados encontrados com os ensaios de caracterização foi possível classificar o solo conforme os seguintes sistemas: EMBRAPA, SUCS e AASHTO.

Conforme EMBRAPA (triângulo textural detalhado), o solo foi classificado como franco arenoso. Pelo sistema da AASHTO, foi encontrado um solo do tipo fino argiloso de fraco a pobre para uso em subleito. E pela classificação do SUCS o solo pode ser considerado argiloso arenoso.

É importante ressaltar que foram utilizados três métodos de classificação do solo, dos quais obteve-se respostas diferentes. Segundo Machado e Machado (2010), os sistemas AASHTO e SUCS de classificação foram desenvolvidos com o intuito de classificar solos de países de clima temperado, e por isso não possuem bons resultados quando utilizados na classificação de solos tropicais. Diante disso, optou-se por adotar a classificação provinda do triângulo textural da EMBRAPA por se tratar de um método

os que apresentaram maior semelhança com o método padrão (EST), sendo somente na UTP de 15% que ocorreu diferença significativa. Nos métodos MIC, FSA, FSA0 e SPD, duas ou três UTP apresentaram diferença significativa quando comparadas ao método padrão. E para o método MPAF em todas as UTP os valores foram significativamente diferentes do método padrão. Com os valores de umidade obtidos diretamente pelos métodos alternativos e método

Tabela 2. Médias  $\pm$  erro padrão das umidades, em percentual, obtidas pelos diferentes métodos de determinação sem calibração

UTP	EST	MIC	FCA	FSA	FSA0	SPD	MPAF
5	5,80 $\pm$ 0,05	5,29 $\pm$ 0,10	5,42 $\pm$ 0,05 <sup>ns</sup>	7,59 $\pm$ 0,18	7,50 $\pm$ 0,20	5,83 $\pm$ 0,09 <sup>ns</sup>	5,07 $\pm$ 0,02
10	10,58 $\pm$ 0,15	10,41 $\pm$ 0,05 <sup>ns</sup>	10,14 $\pm$ 0,19 <sup>ns</sup>	11,53 $\pm$ 0,28	11,42 $\pm$ 0,29	10,10 $\pm$ 0,15 <sup>ns</sup>	8,33 $\pm$ 0,04
15	16,07 $\pm$ 0,08	15,31 $\pm$ 0,10	15,54 $\pm$ 0,13	16,26 $\pm$ 0,10 <sup>ns</sup>	15,79 $\pm$ 0,09 <sup>ns</sup>	15,00 $\pm$ 0,20	18,61 $\pm$ 0,25
20	20,56 $\pm$ 0,16	20,24 $\pm$ 0,07 <sup>ns</sup>	20,40 $\pm$ 0,13 <sup>ns</sup>	22,59 $\pm$ 0,86 <sup>ns</sup>	22,48 $\pm$ 0,9 <sup>ns</sup>	19,53 $\pm$ 0,88 <sup>ns</sup>	24,92 $\pm$ 0,27
25	25,24 $\pm$ 0,11	25,50 $\pm$ 0,07 <sup>ns</sup>	25,49 $\pm$ 0,06 <sup>ns</sup>	26,40 $\pm$ 0,16	26,21 $\pm$ 0,2 <sup>ns</sup>	23,73 $\pm$ 0,67	31,89 $\pm$ 0,17

<sup>ns</sup> Médias nas linhas com diferença não significativa em relação ao controle (EST) pelo teste estatístico de Dunnett ao nível de 5%. UTP – Umidade teórica de preparação; EST – Estufa; MIC – Micro-ondas; FCA – Frigideira com areia; FSA – Frigideira sem areia; FSA0 – Frigideira sem areia leitura inicial, SPD – Speedy e MPAF – medidor portátil de alta frequência.

Tabela 3. Parâmetros das curvas de calibração para os diferentes métodos testados na predição dos valores de umidade pelo teste padrão (ordem crescente pelo EPR)

Curva de Calibração	Intercepto	Inclinação	R <sup>2</sup> aj	EPR	Regressão
FCA	0,7243*	0,9693*	99,82%	0,30%	sig
MIC	0,7235*	0,9724*	99,76%	0,35%	sig
SPD	-0,1954 <sup>ns</sup>	1,0678*	98,67%	0,83%	sig
MPAF	3,4782*	0,6851*	98,30%	0,93%	sig
FSA	-1,0338 <sup>ns</sup>	0,9888*	98,07%	0,99%	sig
FSA0	-0,8391 <sup>ns</sup>	0,9887*	97,52%	1,13%	sig

Intercepto e Inclinação – parâmetros da regressão analisados pelo teste t sendo \*Significativo ao nível de 5% e <sup>ns</sup> não significativo; R<sup>2</sup>aj - Coeficiente de determinação ajustado, EPR – Erro Padrão Residual e sig – regressão significativa pelo teste F (p<0,01); EST – Estufa; MIC – Micro-ondas; FCA – Frigideira com areia; FSA – Frigideira sem areia; FSA0 – Frigideira sem areia leitura inicial, SPD – Speedy e MPAF – medidor portátil de alta frequência.

padrão, gerou-se curvas de calibração de umidade, que foram obtidas por meio de regressão linear. O resultado pode ser observado na Tabela 3.

Observa-se na Tabela 3, que todas as regressões foram significativas pelo teste F (p<0,01) e que os coeficientes de determinação ajustados (R<sup>2</sup>aj) das curvas de calibração apresentaram-se satisfatórios (próximos a 1). Os menores valores de erro padrão residual (EPR) das curvas de calibração foram observados para os métodos FCA e MIC.

O método FCA obteve a melhor resposta para a curva de calibração apresentando um R<sup>2</sup>aj de 99,82% e um EPR de 0,30%. O método frigideira com areia (banho de areia ou aquecimento direto) não é muito utilizado e encontra-se pouco material sobre ele. É um método que foi utilizado pela empresa Geotécnica S.A. para controle tecnológico de compactação de barragens de terra, contudo foram verificadas variações consideradas demasiadas e o método foi substituído pelo método SPD (MELLO; SILVEIRA; SILVEIRA,

1959). Fato interessante a ser citado é que os autores verificaram um comportamento contrário ao que encontramos neste trabalho, sendo o método FCA, mesmo sem calibração, o que obteve os resultados mais semelhantes ao método padrão e com o menor EPR na curva de calibração.

A curva de calibração para o método MIC apresentou um R<sup>2</sup>aj igual a 99,76% e um EPR de 0,35%. Tavares et al. (2008) obtiveram um R<sup>2</sup> de 97,38%, considerando 9 solos diferentes, massas iniciais de 20, 40 e 60 g e diferentes umidades iniciais, concluíram que em 240 s e com a curva obtida é possível estimar o teor de umidade na estufa utilizando o método MIC.

Cormick (2015) em seu trabalho com diferentes solos, diferentes teores de matéria orgânica, diferentes teores e tipos de argilominerais (Caulinita, Bentonita, Ilita), e diferentes teores de umidade (de 3 a 260%) observou EPRs de 0,21 a 3,92%, sendo que os maiores EPRs foram observados nos maiores valores de umidade. O autor concluiu que de modo geral o

uso do micro-ondas para a estimativa da umidade gera bons resultados, contudo não observou bons ajustes para solos com mais de 110% de umidade e mais de 10% de teor de matéria orgânica.

Quintino et al. (2015), que trabalharam com cinco perfis de solos distintos, afirmaram que o MIC é viável para obtenção da umidade do solo em condições externas ao laboratório.

O SPD ficou na terceira posição, apresentando um  $R^2_{aj}$  de 98,67% e um EPR de 0,83%. Em um estudo realizado por Camargo e Costa (1960), num solo arenito Bauru, o  $R^2$  encontrado foi de 94% e o EPR de 0,68%. Braga et al. (2009) encontraram valores de  $R^2$  maiores do que 93%, testando um solo argilo-siltoso e uma areia pura. Entre os autores utilizados para comparativo de resultados nesta pesquisa, eles foram os que mais apresentaram diferenças, porém tais autores afirmaram que o SPD pode apresentar respostas confiáveis, desde que ele seja devidamente calibrado antes do uso.

Observou-se que os dados providos do teste speedy quando testado em umidades mais altas mostraram-se mais distantes do padrão. Isso também foi constatado por Ribeiro et al. (2018) no estudo sobre a comparação do método padrão da estufa e do método speedy na determinação do teor de água no solo. Esses autores constataram que para umidades de 20 e 30%, o speedy não apresentou boas respostas em virtude da dificuldade de desagregação total das partículas de solo no interior do aparelho. Tal dificuldade também foi observada neste trabalho.

Braga et al. (2009) realizaram estudos acerca dos métodos de comparação da umidade e todos eles concluíram que em umidades mais altas, o speedy apresenta valores mais baixos em relação ao padrão da estufa, corroborando com as respostas encontradas no presente trabalho.

A curva ajustada para o método MPAF, apresentou um  $R^2_{aj}$  igual a 98,30% e um EPR de 0,93%. Apesar de ter sido realizada uma calibração específica para o uso do solo da presente pesquisa no aparelho, esse resultado pode ser explicado pelo fato do mesmo ser indicado para materiais compostos por grãos maiores, sendo muito utilizado na agricultura para averiguação da umidade de soja, milho e afins, conforme indica o

manual do próprio aparelho. Porém, decidiu-se testá-lo com o intuito de buscar métodos alternativos que pudessem ser aplicados para obtenção da umidade do solo com maior rapidez (-10 segundos).

Para o método frigideira sem areia, os resultados foram analisados de duas formas, a primeira com os dados iniciais considerando apenas o primeiro tempo de aquecimento (FSA0), como normalmente é realizado em campo (em média 9 minutos), a qual apresentou um  $R^2_{aj}$  de 97,52%; e a segunda forma, que teve como critério de parada a constância de massa (FSA) e por isso mais tempo de aquecimento (em média 18 minutos), que apresentou um  $R^2_{aj}$  de 98,07%.

Os menores valores de  $R^2_{aj}$  e maiores EPRs apresentados para os métodos da frigideira sem areia (FSA e FSA0), podem ser explicados pela queima de matéria orgânica no aquecimento direto, assim como constatou Braga et al. (2009) no método do álcool etílico e Quintino et al. (2015). Ambos os trabalhos afirmam que a temperatura de aquecimento deve ser mantida de forma que não queime os constituintes do solo, como matéria orgânica, por exemplo. Por isso o maior  $R^2_{aj}$  e menor EPR apresentados pela curva de calibração do método frigideira com areia (FCA), podem ser justificados, uma vez que o aquecimento de maneira gradual, fez com que a amostra não perdesse massa orgânica, mas somente água.

Na Tabela 4 estão apresentados os dados obtidos dos ensaios de umidade do solo realizados para os diferentes métodos de determinação considerando o uso da curva de calibração do respectivo método e o resumo das análises estatísticas.

Observa-se que após utilizar as curvas de calibração para todos os métodos ensaiados, os valores de umidade para os métodos MIC, FCA e SPD podem ser considerados estatisticamente iguais ao controle em todos os valores de umidade testados. Baseado nos resultados obtidos nesta presente pesquisa, pode-se afirmar que as curvas de calibração geradas para obter a umidade padrão da estufa, utilizando os métodos MIC, FCA e SPD podem ser utilizadas.

Para os métodos FSA, FSA0 e MPAF, mesmo após a utilização das curvas de calibração, ocorreram diferenças significativas em dois valores de UTP. Tal

Tabela 4. Médias  $\pm$  erro padrão das umidades, em percentual, obtidas pelos diferentes métodos de determinação após calibração

UTP	EST	MIC	FCA	FSA	FSA0	SPD	MPAF
5	5,80 $\pm$ 0,05	5,87 $\pm$ 0,09 <sup>NS</sup>	5,98 $\pm$ 0,05 <sup>NS</sup>	6,47 $\pm$ 0,17	6,58 $\pm$ 0,20	6,03 $\pm$ 0,09 <sup>NS</sup>	6,95 $\pm$ 0,02
10	10,58 $\pm$ 0,15	10,85 $\pm$ 0,04 <sup>NS</sup>	10,55 $\pm$ 0,19 <sup>NS</sup>	10,37 $\pm$ 0,28 <sup>NS</sup>	10,45 $\pm$ 0,29 <sup>NS</sup>	10,59 $\pm$ 0,16 <sup>NS</sup>	9,19 $\pm$ 0,03
15	16,07 $\pm$ 0,08	15,61 $\pm$ 0,09 <sup>NS</sup>	15,79 $\pm$ 0,12 <sup>NS</sup>	15,04 $\pm$ 0,09	14,77 $\pm$ 0,09	15,82 $\pm$ 0,21 <sup>NS</sup>	16,23 $\pm$ 0,17 <sup>NS</sup>
20	20,56 $\pm$ 0,16	20,41 $\pm$ 0,07 <sup>NS</sup>	20,50 $\pm$ 0,13 <sup>NS</sup>	21,30 $\pm$ 0,85 <sup>NS</sup>	21,38 $\pm$ 0,90 <sup>NS</sup>	20,66 $\pm$ 0,94 <sup>NS</sup>	20,55 $\pm$ 0,18 <sup>NS</sup>
25	25,24 $\pm$ 0,11	25,52 $\pm$ 0,07 <sup>NS</sup>	25,43 $\pm$ 0,06 <sup>NS</sup>	25,07 $\pm$ 0,15 <sup>NS</sup>	25,07 $\pm$ 0,20 <sup>NS</sup>	25,15 $\pm$ 0,71 <sup>NS</sup>	25,33 $\pm$ 0,12 <sup>NS</sup>

<sup>NS</sup> Médias nas linhas com diferença não significativa em relação ao controle (EST) pelo teste estatístico de Dunnett ao nível de 5%. UTP - Umidade teórica de preparação; EST – Estufa; MIC – Micro-ondas; FCA – Frigideira com areia; FSA – Frigideira sem areia; FSA0 – Frigideira sem areia leitura inicial, SPD – Speedy e MPAF – Medidor portátil de alta frequência.

fato pode ser justificado por suas curvas de calibração terem os maiores erros padrões residuais (EPR) dentre as 6 curvas de calibração geradas (Tabela 3).

Apesar das curvas de calibração para os métodos das frigideiras sem areia (FSA e FSA0) terem mostrado bons ajustes, observou-se que um dos métodos mais aplicados em campo para obtenção da umidade em obras de controle da compactação, por vezes pode apresentar respostas inadequadas e por isso, os valores obtidos por tal método, devem ser tomados com cautela, visto que os resultados podem se apresentar diferentes do padrão dependendo da faixa de umidade analisada.

### Verificação das curvas de calibração

Na Tabela 5 está apresentado um resumo da validação das curvas de calibração de umidade dos métodos alternativos para o método padrão (estufa).

Observou-se que o uso das curvas de calibração para os métodos SPD, MIC e FCA permitiram obter

valores de umidade semelhantes aos do método controle, tanto para o solo na condição de campo, quanto para um solo preparado em laboratório.

Ambos os métodos testados com a frigideira sem areia, utilizando o solo em condição de campo, proveram valores de umidade considerados semelhantes ao método de controle sem o uso das curvas de calibração e após usar elas apresentaram valores diferentes ao método de controle, inclusive aumentando a diferença entre o valor observado e o valor de controle.

Ao analisar os resultados obtidos pelo método MPAF, calibrados ou não, verificou-se que em todas as situações os valores de umidade foram significativamente diferentes do método de controle. Sendo este tipo de equipamento indicado para grãos de maiores dimensões (biomassa, pellets, serragem, grãos agrícolas) era esperado que fossem verificadas diferenças entre sua determinação direta e o método de controle para sua utilização com o solo, contudo se esperava que ao empregar uma curva de calibração

Tabela 5. Resumo da verificação: umidades obtidas após uso das curvas de calibração para método padrão.

Método	CAMPO <sup>a</sup>				LABORATÓRIO <sup>b</sup>			
	Umidade(%)	$\Delta$ (%)	Umidade calibrada (%)	$\Delta$ (%)	Umidade(%)	$\Delta$ (%)	Umidade calibrada (%)	$\Delta$ (%)
EST	10,81 $\pm$ 0,01	-	-	-	24,43 $\pm$ 0,22	-	-	-
SPD	10,33 $\pm$ 0,07	-0,48	10,84 $\pm$ 0,07 <sup>ns</sup>	0,03	23,07 $\pm$ 0,35	-1,36	24,44 $\pm$ 0,38 <sup>ns</sup>	0,01
MIC	10,20 $\pm$ 0,01	-0,61	10,64 $\pm$ 0,01 <sup>ns</sup>	-0,17	23,97 $\pm$ 0,38 <sup>ns</sup>	-0,46	24,04 $\pm$ 0,37 <sup>ns</sup>	-0,39
FCA	10,36 $\pm$ 0,06	-0,45	10,76 $\pm$ 0,06 <sup>ns</sup>	-0,05	24,59 $\pm$ 0,12 <sup>ns</sup>	0,16	24,56 $\pm$ 0,12 <sup>ns</sup>	0,13
FSA	11,09 $\pm$ 0,10 <sup>ns</sup>	0,28	9,93 $\pm$ 0,10	-0,88	26,16 $\pm$ 0,28	1,73	24,84 $\pm$ 0,27 <sup>ns</sup>	0,41
FSA0	10,91 $\pm$ 0,21 <sup>ns</sup>	0,1	9,95 $\pm$ 0,20	-0,86	25,67 $\pm$ 0,33 <sup>ns</sup>	1,24	24,54 $\pm$ 0,32 <sup>ns</sup>	0,11
MPAF	5,70 $\pm$ 0,04	-5,11	7,38 $\pm$ 0,02	-3,43	26,78 $\pm$ 0,67	2,35	21,83 $\pm$ 0,46	-2,6

<sup>a</sup> Medições realizadas diretamente com o solo retirado no campo sem nenhum preparo; <sup>b</sup> Medições realizadas no solo que foi preparado em laboratório; ns Médias nas colunas com diferença não significativa em relação ao controle (EST) pelo teste estatístico de Dunnett ao nível de 5%; EST – Estufa; MIC – Micro-ondas; FCA – Frigideira com areia; FSA – Frigideira sem areia; FSA0 – Frigideira sem areia leitura inicial, SPD – Speedy e MPAF – medidor portátil de alta frequência.

ocorreria uma aproximação entre o valor observado e o valor de controle, fato que não ocorreu.

Os métodos alternativos para determinação de umidade do solo que estão disponíveis aos profissionais são muitos, cada um com suas vantagens e desvantagens, devendo-se para cada tipo de aplicação ser verificado quais os limites aceitáveis de variação em relação ao método padrão (EST). Na execução de obras de pavimentação, a faixa de aceitação em relação a umidade ótima, relatada pela Norma 141 (DNIT, 2010), é de 2% abaixo ou 1% acima da umidade encontrada pelo método da estufa. Excetuando-se o método MPAF (em todas as situações testadas) e as medidas não calibradas dos métodos FSA e FSA0 para o solo em laboratório, os demais resultados observados apresentaram variações dentro da citada norma.

### **Análise dos resultados do ponto de vista de duração e da aplicabilidade**

A Tabela 6 mostra os tempos finais médios de cada método aplicado, desconsiderando os tempos referentes ao esfriamento das amostras antes do procedimento de pesagem, sendo que as amostras não foram pesadas quentes com o intuito de preservar a balança.

O método de ensaio mais rápido, o MPAF (0,17 min ou 10 s), foi o método que apresentou diferença significativa para todas as determinações diretas em relação ao método padrão, bem como nos ensaios de verificação em campo e laboratório (tanto para valores calibrados e não calibrados). Logo, apesar de ser um método rápido, o mesmo não deve ser utilizado para obtenção da umidade de solos por não apresentar resultados satisfatórios, lembrando-se que o referido equipamento é indicado para grãos maiores, muito utilizado na agricultura e com boa precisão para tais

usos, contudo para o solo testado neste trabalho não foi possível obter resultados próximos ao método padrão.

Os valores de umidade calibrados utilizando-se o método SPD são estatisticamente semelhantes ao método padrão da estufa, tanto no ensaio de calibração quanto no de verificação. Além disso, trata-se de um método rápido de obtenção da umidade (1 min), fato que garante ainda mais a viabilidade de aplicação desse equipamento em campo.

O método MIC, quando calibrado, também apresentou resultados semelhantes ao método padrão (tanto na calibração quanto na verificação). Em relação ao tempo de duração do SPD, pode-se que dizer que é um método mais demorado, entretanto, comparando-o com método padrão da estufa, ele apresenta um tempo bastante satisfatório, com uma média de 13 min de duração. Por isso, observou-se que esse método se torna passível de aplicação, sendo que atualmente temos à disposição alguns modelos de micro-ondas portáteis. Zein (2002) relatou que com o uso de curvas de calibração o MIC é um procedimento conveniente e confiável para a determinação rápida da umidade do solo, em seu trabalho verificou que a melhor combinação de ensaio foi 50 g de amostra de solo e tempos de secagem de 7 e 9 min para solos arenosos e argilosos, respectivamente.

Em relação ao tempo de duração dos ensaios da frigideira, percebeu-se que o FSA0 é um método relativamente rápido, com uma duração máxima de 10 minutos nos intervalos testados neste trabalho. Porém, conforme discutido, o critério de leitura inicial não está de acordo com a Norma D-4959 (ASTM, 2016) pelo fato de o ensaio não acontecer até a constância de massa, e esse fato pode influenciar negativamente os resultados, contudo é um dos métodos mais utilizados

Tabela 6. Duração média dos ensaios de obtenção da umidade

Ensaio / UTP	5%	10%	15%	20%	25%
	Tempo de ensaio (min)				
EST	1440	1440	1440	1440	1440
MPAF	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17
SPD	1	1	1	1	1
MIC	10	12	15	14	13
FSA	17	19	23	16	17
FSA0	8	8	10	10	10
FCA	34	38	46	35	40

em campo e se executado de forma cautelosa pode auxiliar de forma positiva na determinação da umidade do solo.

Por fim, analisou-se o comportamento da frigideira com areia e frigideira sem areia. No primeiro caso, obteve-se um tempo máximo de ensaio de 46 minutos, e no segundo, 23 minutos, que comparados ao micro-ondas e speedy são tempos relativamente altos, porém bem mais rápidos quando confrontados com as 24 horas necessárias de aquecimento em estufa. Cabe destacar que o método da frigideira com areia foi aplicado com o intuito de analisar qual seria o comportamento do solo mediante aquecimento indireto. Como pôde-se observar, o tempo de duração do ensaio dobrou ao realizá-lo com aquecimento indireto, porém esse método garantiu a perda de água de uma forma gradual preservando os constituintes do solo.

Cabe destacar que a umidade é um parâmetro sensível a vários fatores, tais como: tipo de operação dos aparelhos, problemas de precisão e ajustes dos equipamentos e temperatura ambiente. Para qualquer método que for escolhido, deve-se sempre realizar estudos prévios com os solos que serão utilizados, para que se possa ter maior confiança nos ensaios realizados.

## CONCLUSÃO

Em relação as curvas de calibração dos métodos alternativos elaboradas neste artigo, considerando solo franco arenoso e com uma faixa de umidade de 5 a 25%, observou-se que os métodos micro-ondas (MIC), frigideira com areia (FCA) e speedy (SPD) podem ser utilizados a fim de obter os valores de umidade por métodos alternativos. Os métodos FSA, FSA0 e MPAF tanto na calibração quanto na verificação apresentaram diferenças significativas entre a umidade obtida por tais métodos e pelo método padrão.

Sugere-se que os métodos estudados nesta pesquisa sejam replicados utilizando diferentes tipos de solo e com mais pontos de umidade (intervalos menores entre as umidades ensaiadas). Acredita-se ser importante realizar novos ensaios em solos com diferentes teores de matéria orgânica com o intuito de verificar em qual temperatura ocorre a perda desse constituinte do solo e como este fato pode influenciar na obtenção da umidade, visto que se encontraram poucas informações acerca desse fato.

## REFERÊNCIAS

- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. (ASTM). **D - 4643** - Determination of Water (Moisture) Content of Soil by the Microwave Oven Heating. West Conshohocken, 2000.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **D - 4959** - Determination of Water (Moisture) Content of Soil by Direct Heating. West Conshohocken, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6457**: Amostras de solo — Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro: ABNT, 2016. 8 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6459**: Solo – Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro: ABNT, 2016. 5 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6508**: Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 1984. 8 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7180**: Solo Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro: ABNT, 2016. 3 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7181**: Solo Análise granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2016. 12 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 13600**: Solo - Determinação do teor de matéria orgânica por queima a 440°C. Rio de Janeiro: ABNT, 1996. 2 p.
- BERNEY IV, E.S.; KYZAR, J.; OYELAM L. **Device Comparison for Determining Field Soil Moisture Content**. Report No. ERDC/GSL TR-11-42. US Army Corps of Engineers Geotechnical and Structures Laboratory: Vicksburg, 2011. 62 p.

- BIOPOINT. Biopoint moisture analyzer. **Manual de instruções do equipamento Biopoint 200**. Barcelona, 2014. 4 p.
- BRAGA, G. V. B. P.; RIBEIRO, M. J. S.; FERREIRA, P. M. M.; GUIMARÃES, R. O.; SANTOS, T. L.; VIANA, P. M. F. Comparação de métodos de determinação do teor de umidade. In: Semana da engenharia civil, 7, Universidade Estadual de Goiás, 2009, Anápolis. **Anais...** Anápolis: 2009. 8 p.
- CAMARGO, A. P.; COSTA, A. O. L. Determinação rápida da umidade do solo pelo método da reação com o carbureto de cálcio. **Boletim Técnico do Instituto Agrônomo do Estado de São Paulo**, v. 19, n. 30, p 493-502, 1960.
- CAPUTO, H. P. **Mecânica dos solos e suas aplicações: Fundamentos**. 6. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1996. 234 p.
- CORMICK, A. **Comparing Different Heating Methods for Determination of Moisture Content in Soils**. 2015. 261 f. Dissertation (Bachelor of Engineering) - University of Southern Queensland, Faculty of Engineering and Surveying, Queensland, 2015.
- CREMON, C.; LONGO, L.; MAPELI, N. C.; SILVA, L. A. M. SILVA, W. M. Determinação da umidade de diferentes solos do Pantanal Matogrossense via microondas e método padrão. **Revista Agrarian**, v.7, n.24, p.280-288, 2014.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM (DNER). **ME 052/94: Solos e agregados miúdos – determinação da umidade com emprego do “Speedy”**. Rio de Janeiro, 1994b.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM (DNER). **ME 213/94: Solos – determinação do teor de umidade**. Rio de Janeiro, 1994a.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **Norma – 141/2010: Pavimentação – Base estabilizada granulometricamente - Especificação de serviço**. Rio de Janeiro, 2010.
- DEPARTAMENTO AUTÔNOMO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL (DAER – RS). **Manual de Ensaios**, v. 1. Secretaria dos Transportes. Unidade de normas e pesquisas. Rio Grande do Sul, 2001.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Manual de métodos de análise de solos**. 2. ed. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 1997. 212 p.
- GHELFI FILHO, H. G. **Estudo comparativo do método das pesagens e o método gravimétrico padrão para a determinação do teor de umidade do solo**. ESALQ, Piracicaba, 45 (parte 1), p 99-108, 1988.
- LEKSHMI, S. U. S.; SINGH, D. N.; BAGHINI, M. S. A critical review of soil moisture measurement. **Measurement**, v. 54, p. 92-105, 2014.
- LIMA, S. C. **Solo: manejo, conservação e uso sustentável**. Uberlândia: Roma, 2007. 53 p.
- MACHADO, S. L.; MACHADO, M. F.C. **Mecânica dos solos 1: Conceitos introdutórios**. Universidade Federal da Bahia - Departamento de ciência e tecnologia dos materiais, 2010. (Apostila).
- MELLO, V. F. B.; SILVEIRA, E. B. S.; SILVEIRA, A. Geotécnica's Experience in Compaction Control of Earth Dams. In: 1st Panamerican Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering (PCSMFE), 1959, Mexico. **Proceedings...** Mexico, 1959, v. 2, p. 637-655.
- MELLO, V. F. B.; TEIXEIRA, A. H. **Mecânica dos solos, fundações e obras de terra**. 2.ed. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos, 1962. 171 p.

- MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO (MAPA). **Determinação de matéria seca e umidade em solos e plantas com forno micro-ondas doméstico.** Circular técnica 33. 2. ed. São Carlos – SP, 2002.
- QUINTINO, A. C.; ANDRADE, P. J.; SILVA, T. J.; CANEPPELE, M. A.; ABREU, J. G. Métodos de Determinação de Umidade nos Solos de Cerrado. **Enciclopédia Biosfera**, v. 11, n. 22, p. 2202-2213, 2015.
- R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing.** Versão 4.1.0. [Camp Pontanezen]. R Foundation for Statistical Computing: Vienna, Austria, 2021.
- RIBEIRO, K. M.; CASTRO, M. H. C.; RIBEIRO, K. D.; LIMA, P. L. T.; ABREU, L. H. P.; BARROS, K. L. C. Estudo Comparativo do Método Padrão da Estufa e do Método Speedy na Determinação do Teor de Água no Solo. **Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas**. v. 12, n 1, p. 18-28, 2018.
- SEBESTA, S.; OH, J.; LEE, S. I.; SANCHEZ, M.; TAYLOR, R. **Initial review of rapid moisture measurement for roadway base and subgrade.** Texas Department of Transportation Research and Technology Implementation Office. 2013. Austin, Texas. 2013.
- TAVARES, M. H. F.; CARDOSO, D. L.; GENTELINI, D. P.; GABRIEL FILHO, A.; KONOPATSKI, E. A. Uso do forno de microondas na determinação da umidade em diferentes tipos de solo. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 29, n. 3, p. 529-537, 2008.
- WALKER, J. P.; WILLGOOSE, G. R.; KALMA, J. D. In situ measurement of soil moisture: a comparison of techniques. **Journal of Hydrology**, v. 293, n. 1-4, p. 85-99, 2004.
- ZEIN, A. K. Rapid determination of soil moisture content by the microwave oven drying method. **Sudan engineering society journal**, v. 48, n. 40, p. 43-54, 2002.