

## Obtenção, no campo, do Teor de Umidade dos Solos com o sensor FDR: vantagens em relação aos métodos convencionais e influência dos valores da massa específica do solo

Thiago de S. Carnavale<sup>1,2</sup>, Tácio M. P. de Campos<sup>2</sup> e Antônio R.M.B. de Oliveira<sup>2</sup>.

Departamento de Engenharia Civil, Pontifical Catholic University of Rio de Janeiro;  
Centro de Ciências e Tecnologia do Centro Universitário Serra dos Órgãos (UNIFESO),  
Phd.

### Field Monitoring - FDR's Bulk Density Dependence for Moisture Content Measurements

**Abstract.** *Sensors based on frequency domain reflectometry (FDR's) are used to monitoring soil volumetric water content (VWC). This technical note analyzes if different bulk densities cause changes in VWC values. The methodology consists in testing the influence of variation of bulk density in VWC values by using two compaction tests. In addition, three different installation procedures were tested. The results show that EC-5 precision is deeply affected by the installing procedures. Finally, a comparison of the results obtained by the installation methods of the Decagon's probes with lab results, we conclude that the field monitoring, based on driving the rod directly into the soil, presents the better way to install the equipment. However, it requires calibration to any installation point to obtain data accuracy during the field monitoring.*

**Keywords:** *Water content, field monitoring, FDR*

**Resumo.** Sensores baseados em reflectometria de domínio de frequência (FDR) são usados para monitorar o teor de umidade volumétrica (VWC) dos solos. Esta Nota Técnica analisa se diferentes métodos de instalação da sonda EC-5, da Decagon Devices Inc., causam mudanças nos valores obtidos de VWC. A metodologia consiste em testar a influência da variação da densidade em valores VWC de dois solos utilizando dois ensaios de compactação: Proctor Normal e por sistema hidráulico (desenvolvido exclusivamente para esta pesquisa). Além da análise de variação da densidade aparente, foram testados três procedimentos de instalação diferentes. Os resultados mostraram que a precisão EC-5 é profundamente afetada pelos procedimentos de instalação. Finalmente, uma comparação dos resultados obtidos pelos diferentes métodos de instalação das sondas Decagon com resultados de laboratório, conclui-se que a instalação de campo baseada na cravação direta da haste no solo, apresenta a melhor forma de instalar o equipamento.

**Palavras-chave:** Umidade volumétrica, monitoramento de campo, FDR

### Introdução

A determinação da umidade volumétrica dos solos - VWC - é um procedimento importante na Engenharia Civil, como destacam Ortigão (1996), Marinho (1997) e de

Campos (1997). A sua determinação pode ser realizada de duas formas: (i) através da determinação do conteúdo gravimétrico, ou seja, da razão entre a massa de água e a massa de solo seco; (ii) através de sensores capacitivos, cuja aplicação se baseia na definição das distintas magnitudes de constante dielétrica entre água, ar e solo.

O presente artigo técnico trata da obtenção da VWC dos solos através dos sensores do tipo FDR, ou seja, aqueles que se baseiam na reflectometria do domínio de frequência. Em especial, ele discute a influência, nas medições de VWC, da variação de métodos de instalação dos sensores no campo e dos valores de massa específica do solo. O objetivo é ressaltar se o monitoramento com o equipamento oferece valores de VWC muito discrepantes em relação aos obtidos com auxílio de anéis volumétricos e secagem em estufa.

Solo é um meio multifásico que consiste em materiais que possuem arranjo elétrico, iônico, orientados de formas distintas, por consequência de diversos mecanismos de polarização (Xu et al., 2011). Nesse contexto, a reflectometria no domínio da frequência utiliza radiofrequência e a capacitância do solo para determinar a constante dielétrica do solo (Lukanu & Savage, 2006). A técnica apresenta aceitação por promover resultados rápidos, *in situ*, de uma maneira não destrutiva, que relaciona propriedades dielétricas do solo com o teor de umidade (Raed et al., 2014). Para isso, ao menos duas técnicas são empregadas de acordo com Oates et al., (2017): utilizando a capacitância do solo com parte do filtro de passa-baixa, medindo a atenuação de um sinal de frequência fixado ou utilizando a capacitância do solo como uma componente de controle em um oscilador de frequência variável.

Como resultado, as análises efetuadas no domínio da frequência possuem grande potencial para a determinação do conteúdo de umidade volumétrica. No entanto, para o emprego de sensores FDR's pode-se demandar uma numerosa rotina de calibração, com um elevado número de parâmetros para serem determinados para que os dados possuam maior correlação ao seu estado real (Minet et al., 2010).

As bases conceituais adotadas neste artigo podem ser encontradas em Topp (1980), Veldkamp & O'Brien (2000), Hayat (2008), Portocarrero (2009), Choi et al. (2015) e Bore et al. (2015). De uma forma geral, estes trabalhos acadêmicos discutem, a partir do trabalho de Topp (1980), a evolução da técnica enquanto ferramenta de auxílio ao monitoramento de campo, os efeitos da argila, teor de matéria orgânica e massa específica (Lukanu & Savage, 2006), assim como ressalta a importância da calibração do equipamento na obtenção de dados mais precisos.

## **Materiais e Métodos**

Os solos testados são dois solos residuais maduros de uma rocha granito-gnáissica do distrito de Tinguá, município de Nova Iguaçu, baixada fluminense. As amostras foram obtidas no Campus Avançado da Pontifícia Universidade Católica (Pt1 - UTM WGS84, zona 23S 663961E/7500946N), e no interior da Reserva Biológica do Tinguá (Pt2 - UTM WGS84, zona 23S 658916E/7502347N).

Como primeiro procedimento, foi efetuada a caracterização física dos materiais com o objetivo de se obter a distribuição granulométrica e as propriedades-índices. A análise granulométrica (Tabela 1) foi pautada nas recomendações da ABNT (1984a). Contudo, os ensaios de sedimentação foram efetuados com o material passante na peneira de 0,42mm (#40), ao invés do material passante na peneira de 2mm (#10). Para tal, foram utilizados 50g de solo destorroado, seco ao ar, em 125mL de hexametáfosfato (H). Após

24 horas em repouso, procedeu-se a dispersão mecânica e colocou-se a mistura em uma proveta de 1000mL, completando-se o volume com água destilada. Agitou-se a proveta por um minuto e realizaram-se as leituras do densímetro por 24 horas. Ao final das leituras, o material foi colocado em uma peneira de 0,075mm (#200) e submetido ao processo de lavagem, secagem em estufa e peneiramento fino. O material retido na peneira de 0,42mm (#40) foi lavado, levado para a estufa e, após a secagem, foi utilizado para a realização do peneiramento grosso.

No que toca às propriedades-índices (Tabela 2), a massa específica dos grãos, foram utilizados 100g do material, passante na peneira #40, seco em estufa (105°C), distribuídos igualmente em quatro picnômetros de 250mL. Realizou-se a extração do ar utilizando uma bomba de vácuo durante 15 minutos ou até que fosse detectada a ausência total de bolhas. Os valores obtidos a partir das médias aritméticas de cada uma das quatro determinações foram divididos pela massa específica da água, obtendo-se então a densidade relativa dos grãos,  $G_s$ . Os demais parâmetros foram obtidos através de relações massa-volume.

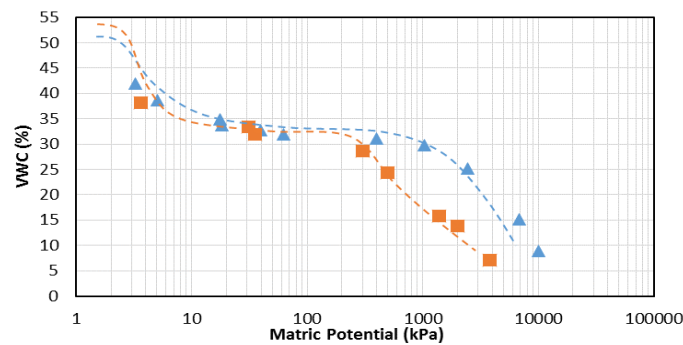
Tabela 1: Granulometria

Amostra	Gravel	Areia			Finos		
		Grossa	Média	Fina	Silte	Argila	Total
Pt 1	2,9	24,6	14,2	7,7	10,1	40,5	50,7
Pt 2	4,8	31,3	18,2	8,3	10,8	26,6	37,4

Tabela 2: Índices Físicos

Amostra	$G_s$	$\gamma_n$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	e	S (%)
Pt 1	2,66	1,59	1,3	1,06	0,58
Pt 2	2,67	1,66	1,35	1,19	0,68

Outro aspecto de grande relevância para as ciências de solo, sobretudo para a geotecnia em análises hidromecânicas do comportamento de solos não saturados, tange a pressão capilar (Bicalho et al., 2007). Sendo assim, confeccionou-se a curva característica de retenção de umidade (SWRC), pautada no método do papel filtro Whatman 42 (Marinho & Oliveira, 2006), através de rotinas de umedecimento e secagem, a partir da umidade natural. Como resultado, ambas as curvas apresentaram uma geometria bimodal, indicando as diferentes entradas de ar para macro e micro poros, possuindo dois pontos de inflexão (Figura 1).

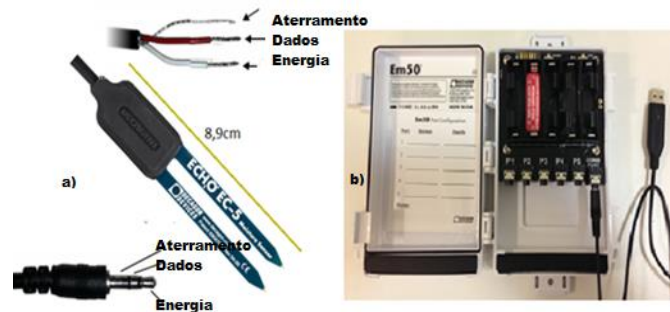


**Figura 1:** Curva característica de retenção de umidade.

A obtenção da curva característica de retenção de umidade é relevante para o presente artigo uma vez que o monitoramento de campo irá fornecer valores de umidade volumétrica. Sendo assim, através da interpolação de resultados, será possível analisar em qual trecho da curva de retenção de umidade o solo se encontra, observando inclusive o aumento do grau de saturação (relevante para o comportamento físico-mecânico dos solos).

Mais além, a SWRC é indispensável para fins de monitoramento, uma vez que delimita as faixas de entrada de ar e água facilitando o manejo, diversas praticas de revegetação e técnicas de estabilização de encostas.

No que toca o monitoramento de campo no presente artigo, os dados de umidade foram aferidos pelo sensor EC-5 (Figura 2(a)). Para aquisição de dados, utilizou-se o logger Em-50 (Figura 2(b)), que possui 05 canais aos quais permitem adquirir dados em formato bruto, valores em mV, ou valores de umidade volumétrica.



**Figura 2:** FDR EC-5 (a) e logger Em50 (b).

Sendo assim, para a determinação do teor de umidade no campo, foram efetuados os seguintes procedimentos:

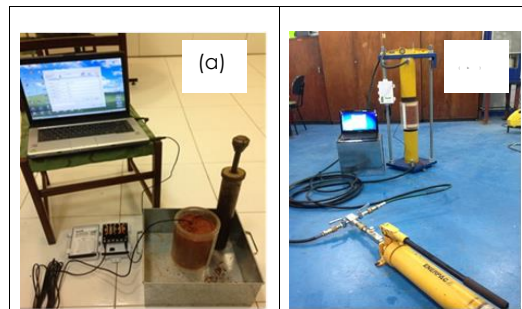
(i) Medição de valores de umidade volumétrica do campo com amostradores volumétricos e posterior secagem em estufa (limites teóricos);

(ii) Replicação das massas específicas de campo em laboratório, com a aplicação de duas metodologias: a) compactação (NBR-7182) com o Proctor Normal (Figura 3a); b) com um equipamento de compactação baseado na técnica de compressão estática (Figura 3b). Os solos foram ensaiados, portanto, com duas densidades diferentes;

(iii) Instalação dos equipamentos com (i) cravação direta no solo, inserção em lama e cravação com auxílio de gabarito de aço duro nas mesmas dimensões do sensor (Figura 4 (a), (b) e (c)).

(iv) Medição com a sonda EC-5, da Decagon Devices Inc., que como os demais

FDR's, que trabalha com a faixa de frequência de 70 MHz, sem problemas com a salinidade e textura dos solos (Decagon, 2014);



**Figura 3:** Compactação com auxílio do Proctor Normal (a), e Sistema de compressão baseado na compressão estática (b).



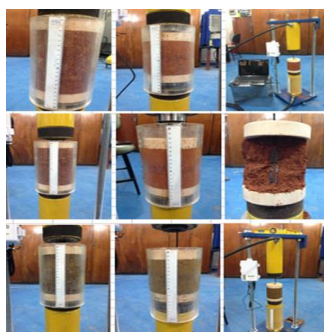
**Figura 4:** Diferentes técnicas de instalação; (a) cravação direta, (b) furo com lama e (c) cravação com auxílio do gabarito de aço.

## Resultados

Os resultados obtidos com o EC-5 no campo e os obtidos no laboratório com os solos compactados segundo os dois métodos de compactação são apresentados na Tabela 3. Observa-se que para massas específicas dos solos diferentes e maiores que no campo, a menor diferença entre campo e laboratório está relacionada entre o aferido com o EC-5 e o equipamento desenvolvido, porque este último permitiu alcançar uma distribuição mais homogênea, sugerindo uma análise qualitativa mais pertinente.

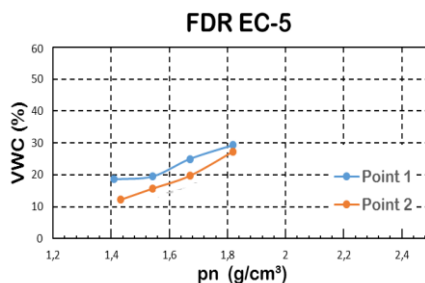
Tabela 3. Métodos de compactação e resultados de laboratório.

	Ponto	EC-5 Resultados			Laboratório	
		VWC (%)	RAW	mV	pn (g/cm <sup>3</sup> )	VWC (%)
Proctor	Pt1	30.6	925	667.5	1.82	26.82
	Pt2	24.8	857	642.3	2	23.67
Sistema Desenvolvido	Pt1	27.6	891	625.6	1.82	24.2
	Pt2	23.3	840	615.2	2	22.8

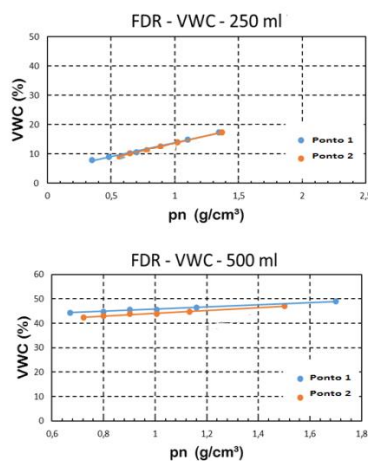


**Figura 5:** Compactação do solo e disposição do sensor EC-5.

Os resultados obtidos indicam também que é fundamental um bom contato entre o solo e a sonda. Como mostra a Figura 5, quanto maior a compactação, maior será a massa específica solo, maior será o contato entre as partículas de solo e a haste do sensor (Figura 6).



**Figura 6.** Correlação entre umidade volumétrica - VWC e massa específica natural dos solos abordados ao longo do projeto.



**Figura 7:** Relação entre a umidade e a variação do peso específico.

### Discussão e Conclusão

As técnicas de compactação mostraram eficiência uma vez que se aproximaram da densidade de campo. A técnica pautada no uso do sistema hidráulico apresentou vantagem, uma vez que, para o maior teor de umidade do solo, não ocorreu deslocamento lateral do sensor inserido no solo.

Os ensaios mostraram que quanto maior o contato entre o grão e o sensor, maior é a umidade volumétrica medida. Assim, compararam-se os valores aferidos pelos sensores em três diferentes técnicas de instalação: sensor cravado direto no solo, embutido em um furo efetuado com trado e preenchido com lama, e com o auxílio de um gabarito. Cabe destacar que os valores aferidos pelo sensor foram comparados com o resultado produzido no laboratório, com auxílio da estufa.

Tabela 4. Compactação de equipamentos instalados e resultados de laboratório.

Testes de Instalação				
VWC (%) – Média de 10 Valores Estatísticos / Ponto				
Ponto	EC-5 Resultados			Laboratório
	Sensor cravado	Lama	Gabarito	Anéis Volumétricos
Pt1	25.2	22.5	21.4	28.87
Pt2	24.8	21.1	20.5	27.14

A comparação entre as técnicas de instalação ressalta o melhor desempenho da técnica que consiste na cravação da haste do sensor diretamente no solo. Entretanto, cabe destacar, que devido à fragilidade da haste, constituída por uma placa de silício, solos com elevada densidade não serão possíveis de efetuar tal técnica.

Além de validar uma metodologia principal de instalação, foi efetuada a calibração do equipamento com base na média aritmética dos valores obtido com a técnica da cravação direta e com a determinação em laboratório. Tal calibração destacou que o sensor, para a referida técnica de instalação, subestima em 3,01% os valores de umidade volumétrica. Com isso, os gráficos passam por uma correção da mesma ordem de grandeza, fazendo com que os dados se aproximem da realidade.

Avaliando tal variação na curva característica de retenção de umidade, ressalta-se que uma variação de 3% no patamar intermediário pode acarretar em erros graves de sucção mátrica, podendo acarretar em análises completamente distintas da real condição de campo, invalidando os resultados de campanhas de monitoramento de campo.

Por fim, é necessário ressaltar de forma positiva que os sensores EC-5 são muito práticos e apresentam bom custo-benefício para o monitoramento em longo prazo sendo indispensáveis para praticas de monitoramento. Em comparação com o método de aferição dos valores de umidade via secagem, ressalta-se a baixa praticidade do método de laboratório para casos de monitoramentos contínuos. Mais além é inviável a aferição de umidades em amostras em um curto intervalo de tempo (ex. 5 minutos).

Por fim, como limitações, dependendo da necessidade de projeto do usuário, destaca-se que este sensor é extremamente sensível às técnicas de instalação, necessitando de calibração para cada uma das técnicas em cada um dos pontos de instalação, ressaltando-se a necessidade de cuidado na instalação em materiais densos.

## Referências Bibliográficas

- Brown, D.Z. and Vinson, R.J. (2006). "Stiffness parameters for a strong and colorful aeolian soil." *Geomaterial Characterization (GSP 199)*, ASCE, Reston/VA: 12-22.
- Cimponella, G.R. and Rubertsen, K.P. (1999). "Common problems with conventional testing." *J. Geotechnical & Geoenv. Engrg.*, Vol. 181 (9): 1193-1199.
- Bicalho, K.V.; Gomes Correia, A.; Ferreira, S.; Fleureau J.M.; and Marinho, F.A.M. "Filter paper method of soil suction measurement", Panamerican Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (2007).
- Influence of saturation degree and role of suction in unsaturated soils behaviour: application to liquefaction (PDF Download Available). Available from: [https://www.researchgate.net/publication/308041686\\_Influence\\_of\\_saturation\\_degree\\_and\\_role\\_of\\_suction\\_in\\_unsaturated\\_soils\\_behaviour\\_application\\_to\\_liquefaction](https://www.researchgate.net/publication/308041686_Influence_of_saturation_degree_and_role_of_suction_in_unsaturated_soils_behaviour_application_to_liquefaction) [accessed Sep 27, 2017].
- Bore, T.; Wagner, N.; Delepine, S.; Taillade, F.; Six, G.; Daout, F.; Placko, D. (2015). "3D-FEM modeling of F/TDR sensors for clay-rock water content measurement in combination with broadband dielectric spectroscopy," in Sensors Applications Symposium(SAS),DOI:10.1109/SAS.2015.7133601;
- Choi, E-Y.; Yoon, Y-H.; Choi, K-Y.; Lee, Y-B. (2015). "Environmentally sustainable production of tomato in a coir substrate hydroponic system using a frequency domain reflectometry sensor." *Journal Article Horticulture, Environment, and Biotechnology* - Korean Society for Horticultural Science; URL: <http://dx.doi.org/10.1007/s13580-015-0036-y> 167-177.
- De Campos, T. M. P. (1997). "Resistência ao cisalhamento de solos não saturados." Anais do 3o Simpósio Brasileiro de Solos Não-Saturados – ÑSAT'97, Rio de Janeiro. v. 2, pp. 399-417.
- Hayat, W.H.; Buck, J.A. (2008). "Eletromagnetismo." tradução JÚNIOR, A.S.; revisão JÚNIOR, A.P. – 7. Ed. – Porto Alegre: AMGH, 2011; ISBN 978-85-63308-76-4.
- Lukanu, G & Savage, Michael. (2006). Calibration of frequency-domain reflectometry for determining soil water content in a clay loam soil. *Water S.A.* 32. . 10.4314/wsa.v32i1.5237.
- Marinho, F. A. M. (1997b). "Mecânica dos solos não saturados, notas de aula do curso de Mecânica dos Solos Não-Saturados." (PEF-5818), Escola Politécnica da USP, 130p.
- Marinho, F. A. M. & Oliveira, O. M. 2006. The filter paper method revised. *ASTM geotechnical testing journal*, USA, 29 (3), 250-258.
- Mendes, J.B.; LI, H.; Xin, H.; DO Nascimento, J.W.B. (2014). "Evaluation of EC-5 Soil Moisture Sensors for Real Time Determination of Poultry Manure or Litter Moisture Content."
- Oates, Martin & Ramadan, Khaled & Martínez, José & Ruiz-Canales, Antonio. (2016). Automatic fault detection in a low cost frequency domain (capacitance based) soil moisture sensor. *Agricultural Water Management.* 183. . 10.1016/j.agwat.2016.12.002.



- Ojo, E.R.; Bullock, P.R.; L'Heureux, J.; Powers, J.; McNaim, H.; Pacheco, A. (2015). "Calibration and Evaluation of a Frequency Domain Reflectometry Sensor for Real-Time Soil Moisture Monitoring." *Vadose Zone Journal*, Vol. 14 no. 3; Publisher: The Soil Science Society of America, Inc. Madison, WI; DOI:10.2136/vzj2014.08.0114; URL: <http://dx.doi.org/10.2136/vzj2014.08.0114>.
- Ortigão, J. A. R. (1996). "Applications in geotechnical engineering." 4th Materials Conference, ASCE, 1996, 11p.
- Portocarrero, H. (2009). "Avaliação do efeito de técnicas de bioengenharia em parâmetros hidrossedimentológicos utilizando instrumentação automatizada." Tese de Doutorado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC-Rio;
- Raed A. Al-Asadi and Abdul M. Mouazen, Combining frequency domain reflectometry and visible and near infrared spectroscopy for assessment of soil bulk density, *Soil and Tillage Research*, Volume 135, January 2014, Pages 60–70.
- Topp, G.C.; Davis, J.L. & Annan, A.P. (1980). "Electromagnetic determination of soil water content: Measurement in coaxial transmission lines." *Water Res. Res.*, 16:547-582.
- Topp, G.C.; Davis, J.L. & Annan, A.P. (1982). "Electromagnetic determination of soil water content using TDR: I. Applications to wetting fronts and steep gradients. *Soil*". *Sci. Soc. Am. J.*, 46:547-582. URL: [http://www2.dbd.puc-rio.br/pergamum/biblioteca/php/mostrateses.php?open=1&arqtese=0421305\\_09\\_Indice.html](http://www2.dbd.puc-rio.br/pergamum/biblioteca/php/mostrateses.php?open=1&arqtese=0421305_09_Indice.html).
- Veldkamp, E.; O'Brien, J.J. (2000). "Calibration of a Frequency Domain Reflectometry Sensor for Humid Tropical Soils of Volcanic Origin." *Soil Science Society of America Journal*. Vol. 64 no. 5 Soil Science Society - Madison, WI DOI: 10.2136/sssaj2000.6451549x URL: <http://dx.doi.org/10.2136/sssaj2000.6451549x>; 1549-1553.
- Xu, Jinghui & Ma, Xiaoyi & D. Logsdon, Sally & Horton, Robert. (2012). Short, Multineedle Frequency Domain Reflectometry Sensor Suitable for Measuring Soil Water Content. *Soil Science Society of America Journal*. 76. 1929. 10.2136/sssaj2011.0361.