

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
DEPARTAMENTO DE ENERGIA NUCLEAR**

**COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR
CENTRO REGIONAL DE CIÊNCIAS NUCLEARES DO NORDESTE**

Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares

**AVALIAÇÃO DA DINÂMICA DA ÁGUA NA RESPOSTA DE SENSOR
TIPO TDR EM SOLOS DE PERNAMBUCO**

SEVERINO MARTINS DOS SANTOS NETO

Orientador: Prof. Dr. Antonio Celso Dantas
Antonino

Co-orientador: Prof. Dr. Carlos Alexandre Barros
de Almeida

Recife, PE
Fevereiro, 2015

SEVERINO MARTINS DOS SANTOS NETO

**AVALIAÇÃO DA DINÂMICA DA ÁGUA NA RESPOSTA DE SENSOR
TIPO TDR EM SOLOS DE PERNAMBUCO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares PROTEN, do Departamento de Energia Nuclear da Universidade Federal de Pernambuco, para obtenção do título de mestre em Ciências. Área de concentração: Aplicação de Radioisótopos / Física dos Solos.

Orientador: Prof. Dr. Antonio Celso Dantas Antonino

Co-orientador: Prof. Dr. Carlos Alexandre Barros de Almeida

Recife, PE
Fevereiro, 2015

Catálogo na fonte
Bibliotecário Carlos Moura, CRB-4 / 1502

S237a

Santos Neto, Severino Martins dos.

Avaliação da dinâmica da água na resposta de sensor tipo TDR em solos de Pernambuco. / Severino Martins dos Santos Neto. - Recife: O Autor, 2015.

97 f. : il., gráfs., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Antonio Celso Dantas Antonino.

Coorientador: Prof. Dr. Carlos Alexandre Barros de Almeida.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares, 2015.

Inclui referências bibliográficas e apêndice.

1. Reflectometria no domínio do tempo. 2. Medidas indiretas de umidade do solo. 3. Equação de calibração. I. Antonino, Antonio Celso Dantas, orientador. II. Almeida, Carlos Alexandre Barros de, coorientador. III. Título.

CDD 631.43 (21. ed.)

UFPE
BDEN/2015-13

***AVALIAÇÃO DA DINÂMICA DA AGUA NA
RESPOSTA DE SENSOR TIPO TDR EM SOLOS DE
PERNAMBUCO***

Severino Martins dos Santos Neto

APROVADA EM: 10.02.2015

ORIENTADOR: Prof. Dr. Antonio Celso Dantas Antonino

CO-ORIENTADOR: Prof. Dr. Carlos Alexandre Barros de Almeida

COMISSÃO EXAMINADORA:

Prof. Dr. Carlos Alberto Brayner de Oliveira Lira – DEN/UFPE

Prof. Dr. Willames de Albuquerque Soares – POLI/UPE

Prof. Dr. José Romualdo de Sousa Lima – UAG/UFRPE

Visto e permitida a impressão

Coordenador(a) do PROTEN/DEN/UFPE

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais Jahilton Pereira dos Santos e Maria José Ferreira Bandeira por tudo investido em mim, a eles a certeza de minha gratidão e amor eterno. Aos meus irmãos e sua respectivas famílias, Maria Olivia, Jahilton Filho, Jahilson Pereira, Sergio Ricardo e Luiz Antonio, eles não medem esforços para o meu desenvolvimento profissional e como pessoa. Agradeço também a todos os meu primos, tios e amigos pela torcida para o meu sucesso.

Agradeço a minha esposa Kamylla Miranda Correia, por todo apoio e ajuda prestadas durante a realização deste trabalho, o meu amor sincero. Sem ela não seria possível a conclusão desta etapa da minha vida, obrigado por tudo.

Ao professor Antonio Celso Dantas Antonino, pelos ensinamentos passados e aos colegas Carlos Alexandre Barros de Almeida e Arthur Paiva Coutinho pelas orientações prestadas ao longo do desenvolvimento deste trabalho, estes ensinamentos levo para toda minha vida profissional.

E a todos os amigos que direta e indiretamente, contribuíram para realização desse trabalho. E a todos colegas do laboratório de Física de Solos, obrigado pelas ajudas recebidas, sozinho ninguém alcança nada.

RESUMO

A estimativa da umidade do solo é imprescindível a qualquer estudo que envolva as propriedades do sistema solo-planta-atmosfera, devido à importância da água no desenvolvimento das plantas e suas implicações em várias propriedades do solo. A estimativa da umidade volumétrica do solo pode ser realizada por vários métodos, dentre eles destaca-se o uso da Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR). Este método relaciona, a constante dielétrica do meio com a umidade volumétrica do solo, medindo o tempo de trânsito de um pulso elétrico através de um guia de ondas. Este estudo avaliou o alcance e a sensibilidade do sensor tipo TDR CS616 da Campbell Sci., os efeitos da dinâmica da água na resposta deste sensor, e o desempenho de uma equação quadrática em relacionar o tempo de resposta (t) em umidade volumétrica de diferentes solos de Pernambuco, além de, realizar calibrações, visando propor equações específicas para os solos estudados. Para a determinação do alcance, foram realizados experimentos, em função de diferentes lâminas e níveis de água. Para analisar a sensibilidade, o sensor foi avaliado em função do uso de diferentes comprimentos do guia de ondas, submetidos à água destilada. Para a medição da umidade volumétrica e da influência da dinâmica da água, foram realizados experimentos simulando calibrações em laboratório, com gotejadores realizando a irrigação, permitindo o umedecimento do solo seco até a saturação em um recipiente transparente. Foram utilizados três tipos de solos com características texturais contrastantes: um solo tipo Areia franca, que foi coletado no município de São João-PE (8° 52' 30" S, 36° 22' 00" O), um solo tipo Franco, coletado no município de Recife-PE (8° 03' S e 34° 58' O) e um solo tipo Franco argiloso, coletado no município de Serra Talhada-PE (07° 56' 50,4" S e 38° 23' 29,0" O). Os resultados permitiram concluir que: (i) o alcance do sensor de umidade CS616 é de aproximadamente 3 cm acima e abaixo do guia de ondas; (ii) o modelo quadrático não apresentou bom desempenho em estimar umidade volumétrica, subestimando em 20 % para o solo arenoso, e superestimando em 4 % e 34 % para os solos siltosos e argilosos respectivamente; (iii) o erro na estimativa do armazenamento de água, aumenta significativamente quando o sensor é utilizado em uma profundidade de solo, maior que o alcance do sensor; (iv) um modelo de terceiro grau, apresentou bom ajuste entre os valores medidos e estimados, com valores de coeficiente de determinação superiores a 95%.

Palavras-chave: reflectometria no domínio do tempo; medidas indiretas de umidade do solo; equação de calibração.

ABSTRACT

The estimation of soil moisture is essential to any study involving the properties of the soil-plant-atmosphere system due to the importance of water in plant development and its implications in various soil properties. The estimate of the volumetric soil moisture can be accomplished by various methods, among them stands out the use of the Time Domain Reflectometry (TDR). This method relates the dielectric constant of the medium with the volumetric soil moisture by measuring the transit time of an electrical pulse through a waveguide. This study evaluated the extent and the sensitivity of the sensor TDR CS616 Campbell of Sci., The effects of water on the dynamic response of the sensor and the performance of a quadratic equation relating the response time (t) for different water content soils of Pernambuco, besides, perform calibrations, aiming to propose specific equations for soils. To determine the range, experiments were carried out for different slides and water levels. To analyze the sensitivity, the sensor was assessed by reference to the use of different lengths of the waveguide, submitted to distilled water. For the measurement of water content and the influence of the dynamics of water, simulated calibration experiments were performed in the laboratory, with drip irrigation performing, allowing the dry soil wetting to saturation in a transparent container. Three types of soils with contrasting textural characteristics were used: one free sand type soil, which was collected in São João-PE (8 52 '30' 'S, 36 22' 00 " W), a solo type Franco, collected in the city of Recife-PE (8 03 'S and 34 ° 58' W) and soil type Franco clay, collected in Serra Talhada-PE (07° 56'50,4 "S and 38° 23'29, 0 "O). The results showed that: (i) the scope of the CS616 humidity sensor is approximately 3 cm above and below the waveguide; (Ii) the quadratic model did not show good performance in estimating soil moisture, underestimating by 20% for sandy soil, and overestimated by 4% and 34% for silty and clay soils respectively; (Iii) the error in the estimated water storage significantly increases when the sensor is used in a soil depth greater than the range of the sensor; (Iv) a third-degree model showed good agreement between the measured and estimated values, with determination coefficient values greater than 95%

Keywords: time domain reflectometry; indirect measurement of soil water; calibration equation

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Propagação de um pulso elétrico no guia de ondas, onde ρ representa o coeficiente de reflexão em função da amplitude de incidência e refletida do pulso.	31
Figura 2 - Sinais de carga e descarga elétrica para capacitâncias equivalentes a solos seco (100 μ s - amarelo) e saturado (244 μ s - azul).....	34
Figura 3 - Ilustração do mapa do estado de Pernambuco, identificando as três regiões de coleta.	37
Figura 4 - Coletor de UHLAND utilizado para coletas de amostras indeformadas do solo.	38
Figura 5 - A) Ilustração demonstrando as dimensões e formato da ferramenta de compactação. B) Ferramenta de madeira confeccionada.	38
Figura 6 - Recipientes plásticos.....	40
Figura 7 - Dimensões dos recipientes.....	40
Figura 8 - Esquema demonstrando o local e as dimensões dos furos confeccionados para inserção do sensor.....	41
Figura 9 - Adaptações quanto ao fornecimento de água: Malha e Gotejadores.	42
Figura 10 - Bombas Peristálticas utilizadas para o fornecimento de água ao experimento.	43
Figura 11 - Sensor de Umidade CS616 e Central de Aquisição de Dados CR10X.	44
Figura 12 - Experimentos Ar x Água.	45
Figura 13 - Esquema demonstrando diferentes inserções do comprimento das haste, resultando em diferente interfaces água-ar.....	47
Figura 14 - Esquema demonstrando algumas etapas do experimento, com diferentes lâminas de água e inserções do sensor.....	48
Figura 15 - Esquema demonstrando diferentes etapas do experimento variando os níveis de água.....	49
Figura 16 - Montagem experimental com 18 cm de espessura de solo no recipiente.	52
Figura 17 - Montagem experimental com 6 cm de espessura de solo no recipiente.	52
Figura 18 - Diferentes etapas experimentais: A) Experimento com 200 minutos de irrigação; B) Experimento com 370 minutos de irrigação.	53
Figura 19 - Tempo de resposta do sensor (t) em função de diferentes posições da interface água-ar.	58
Figura 20 - Tempo de resposta do sensor (t) em função da aplicação de diferentes lâminas de água.....	59
Figura 21 - Tempo de resposta (t) em função de diferentes níveis de água.	61

Figura 22 – Avanço da frente de molhamento (cm) e tempo de resposta do sensor (t), em função do tempo, no experimento com solo tipo Areia Franca.....	63
Figura 23 –Avanço da frente de molhamento e tempo de resposta do sensor (t), em função do tempo, no experimento com solos tipo Franco.....	65
Figura 24 – Avanço da frente de molhamento e tempo de resposta do sensor (t), em função do tempo, no experimento com solos tipo Franco Argiloso.	68
Figura 25 – Experimento realizado com solo tipo Areia Franca, onde se avaliou desempenho do sensor, através de uma equação de quadrática, para estimar Umidade Volumétrica (θ_v).	72
Figura 26 – Experimento realizado com solo tipo Franco, onde se avaliou o desempenho do sensor, através de uma equação de quadrática, para estimar Umidade Volumétrica (θ_v).72	72
Figura 27 – Experimento realizado com solo tipo Franco Argiloso, onde se avaliou o desempenho do sensor, através de uma equação de quadrática, para estimar Umidade Volumétrica (θ_v).	73
Figura 28 – Lâminas medidas em função das lâminas estimadas, nos experimentos com 6 cm de profundidade, realizado com os solos tipo Areia Franca, Franco e Franco Argiloso..	76
Figura 29 – Pontos da calibração realizada com o solo Areia Franca.	79
Figura 30 – Pontos da calibração realizada com o solo tipo Franco.	79
Figura 31 – Pontos da calibração realizada com o solo tipo Franco Argiloso.	80
Figura 32 – Lâminas estimadas em função das lâminas medidas no experimentos com 6 cm de espessura de solo tipo Areia Franca.	95
Figura 33 – Lâminas estimadas em função das lâminas medidas no experimentos com 6 cm de espessura de solo tipo Franco.	95
Figura 34 – Lâminas estimadas em função das lâminas medidas no experimentos com 6 cm de espessura de solo tipo Franco Argiloso.	96
Figura 35 – Lâminas estimadas em função das lâminas medidas no experimentos com 18 cm de espessura de solo tipo Areia Franca.....	96
Figura 36 - Lâminas estimadas em função das lâminas medidas no experimentos com 18 cm de espessura solo tipo Franco.	97
Figura 37 - Lâminas estimadas em função das lâminas medidas no experimento com 18 cm de espessura de solo tipo Franco Argiloso.	97

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Coeficientes da Equação Quadrática.....	45
Tabela 2 - Massa específica, classificação textural e os teores de areia, silte e argila dos solos coletados em São João, Serra Talhada e DEN.....	56
Tabela 3 - Resultado da análise estatística sobre a comparação entre os valores experimentais obtidos e os estimados pela equação quadrática.....	74
Tabela 4 – Massa de água (g) e Umidade volumétrica (θ_v) aplicada por etapa nos experimentos de calibração.....	78
Tabela 5 - Coeficientes da equação polinomial de terceiro grau para os três tipos de solos, com seus respectivos valores de coeficiente de determinação.....	81
Tabela 6 - Tempos de resposta (t) do sensor para as diferentes inserções das hastes (cm), obtidos no experimento 1.....	91
Tabela 7 - Tempos de resposta (t) do sensor para diferentes lâminas de água, obtidos no experimento 2.....	93
Tabela 8 –Tempos de resposta (t) do sensor para seus respectivos níveis de água, obtidos no experimento 3.....	94

LISTA DE SIMBOLOS

θ_g	Umidade Gravimétrica	$[\text{g.g}^{-1}]$
θ_v	Umidade Volumétrica	$[\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}]$
m_a	Massa de Água	$[\text{g}]$
m_s	Massa de Solo	$[\text{g}]$
V_s	Volume de Solo	$[\text{cm}^3]$
V_t	Volume Total	$[\text{cm}^3]$
ρ_s	Massa Específica do Solo	$[\text{g.cm}^{-3}]$
ρ_p	Massa Específica da Partícula	$[\text{g.cm}^{-3}]$
$\rho_{\text{água}}$	Densidade da Água	$[\text{g.cm}^{-3}]$
v	Velocidade	$[\text{m.s}^{-1}]$
c	Velocidade da Luz	$[\text{m.s}^{-1}]$
L	Comprimento	$[\text{cm}]$
t	Tempo de trânsito	$[\mu\text{s}]$
P	Porosidade	$[\%]$
μ_r	Permeabilidade magnética relativa	
V_c	Tensão	
V	Volts	
I_0	Intensidade	
K	Constante Dielétrica	
K_a	Constante Dielétrica Aparente do Solo	
K_{ar}	Constante Dielétrica do Ar	
ϵ_r	Permissividade Elétrica Relativa do Meio	
ϵ_f	Permissividade Elétrica Relativa Efetiva	
ϵ_0	Permissividade Elétrica no Vácuo	
ϵ	Permissividade Elétrica do Meio	
$^{\circ}\text{C}$	Graus Celsius	

Sumário

1	INTRODUÇÃO	15
2	OBJETIVOS	18
2.1	Objetivo geral.....	18
2.2	Objetivos específicos.....	18
3	REVISÃO DE LITERATURA	19
3.1	Água	19
3.1.1	A Importância da água para a produção vegetal.....	19
3.2	Solo.....	20
3.2.1	Textura do solo	21
3.2.2	Massa específica	21
3.3	Umidade do solo.....	22
3.3.1	Métodos diretos de determinação da umidade do solo.....	24
3.3.1.1	Método padrão de estufa	24
3.3.2	Métodos indiretos de determinação da umidade do solo.....	24
3.3.2.1	Tensiômetro	25
3.3.2.2	Método de Bouyoucos.....	27
3.3.2.3	Moderação de nêutrons e atenuação da radiação gama	28
3.4	Métodos dielétricos	29
3.4.1	Método da reflectometria no domínio do tempo – TDR	29
3.4.2	Método da medição pela capacitância elétrica da sonda	33
4	MATERIAIS E MÉTODOS	35
4.1	Coleta dos solos	35
4.2	Caracterização da área de coleta dos solos	35
4.2.1	São João.....	35
4.2.2	Serra Talhada.....	35
4.2.3	Departamento de Energia Nuclear.....	36
4.3	Determinação das propriedades físicas do solo	37
4.4	Preparação e Acondicionamento do Solo	38
4.4.1	Determinação do volume útil do recipiente.....	39
4.4.2	Adaptação da caixa para inserção das hastes do sensor	40

4.4.3	Adaptação da caixa quanto ao fornecimento de água.....	41
4.4.4	Bomba peristáltica	42
4.4.5	Balança eletrônica.....	43
4.4.6	Sensor de umidade tipo TDR - CS616	43
4.4.7	Medidas no Ar e na Água	45
4.4.7.1	Experimento: Tempo de resposta (t) para várias posições da interface água-ar.....	46
4.4.7.2	Experimento: Tempo de resposta do sensor (t) em função da lâmina de água em que as hastes estão submetidas	47
4.4.7.3	Tempo de resposta (t) em função de diferentes níveis de água em que as hastes estão submetidas.....	48
4.4.8	Experimento simulando irrigação com os três solos coletados.	49
4.4.8.1	Preenchimento do recipiente com os solos coletados	49
4.4.9	Montagem Experimental do experimento simulando irrigação com solos	50
4.5	Desempenho do modelo quadrático	53
4.6	Calibrações	54
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	56
5.1	Caracterização física dos solos coletados.....	56
5.2	Medidas no Ar e na Água.....	57
5.2.1	Experimento 1: Tempo de resposta (t) para várias posições da interface água-ar.....	57
5.2.2	Experimento 2: Tempo de resposta (t) em função da lâmina de água em que as hastes estão submetidas	59
5.2.3	Experimento 3: Tempo de resposta (t) em função de diferentes níveis de água em que as hastes estão submetidas	60
5.3	Experimentos simulando irrigação para avaliar o efeito da dinâmica da água e dos atributos físicos do solo no tempo de resposta do sensor (t).....	61
5.3.1	Experimento 4: Realizado com solo Franco Arenoso, com massa específica de $1,55 \text{ g.cm}^{-3}$ e volume de 11700 cm^3	62
5.3.2	Experimento 5: Realizado com solo Franco, com massa específica de $1,55 \text{ g/cm}^3$ e volume de 11700 cm^3	65
5.3.3	Experimento 6: Realizado com solo Franco Argiloso, com massa específica de $1,55 \text{ g/cm}^3$ e volume de 11700 cm^3	67
5.4	Experimentos simulando irrigação, avaliando o desempenho do sensor em solos de Pernambuco	70

5.4.1	Experimentos simulando irrigação, com massa específica de 1,56 g/cm ³ e volume de 3900 cm ³	71
5.4	Análise estatística.....	74
5.5	Impacto da estimativa da umidade volumétrica no armazenamento de água no solo	75
5.6	Calibrações	77
6	CONCLUSÕES	82
	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	83
	REFERÊNCIAS	84
	APÊNDICE.....	91

1 INTRODUÇÃO

O conhecimento do conteúdo de água do solo é imprescindível a qualquer estudo que envolva as propriedades do sistema solo-planta-atmosfera (COELHO et al., 2006), devido à importância da água no desenvolvimento das plantas e sua implicação em várias propriedades do solo e na determinação do balanço hídrico de uma região. O conteúdo de água no solo, controla processos ecológicos, hidrológicos, geotécnicos e meteorológicos, bem como regula os processos de troca de calor e balanço de energia na superfície do solo. Mensurar o conteúdo de água é de fundamental importância, em várias investigações e aplicações pertinentes em agricultura, engenharia hidráulica, hidrologia, meteorologia e mecânica dos solos (ROMANO, 2014).

A estimativa equivocada do conteúdo de água na superfície do solo, pode acarretar numa previsão errônea da partição da precipitação pluviométrica em infiltração e escoamento superficial (CORRADINI, 2014).

Na agricultura, a determinação da umidade do solo é de vital importância para promover o manejo adequado do uso da água no solo, proporcionando assim o planejamento da irrigação visando o aumento da eficiência do uso da água e da produção agrícola. O monitoramento contínuo do conteúdo de água no solo, gera um suporte para uma estratégia eficiente e sustentável do uso da água na irrigação para agricultura de precisão. Para isto, a determinação *in situ* do conteúdo de água no solo é de grande interesse (LACERDA et al., 2005). Conhecer o conteúdo de água presente em grandes extensões de área é necessário para poder maximizar o rendimento de colheitas, auxiliar no controle de enchentes e no monitoramento hídrico (MINELLA et al., 1999).

No campo da agronomia e da engenharia florestal, o conteúdo de água no solo afeta a difusão de nutrientes na região das raízes das plantas. O conteúdo de água no solo é importante para modelagem ou estabilidade geotécnica de morros e colinas em áreas urbanas. O processo de evapotranspiração, transporte de solutos e poluentes e parâmetros hidráulicos como (condutividade hidráulica e difusividade hidráulica) ou mecânicos como (consistência, plasticidade, resistência) são características que dependem do conteúdo da água no solo.

O conhecimento detalhado do conteúdo da água do solo é de interesse para várias aplicações, como os processos hidrodinâmicos no solo, dentre os quais destacamos a infiltração da água no solo, o processo de ascensão capilar, a drenagem e redistribuição da água no solo e a curva de retenção. Nesse contexto, o monitoramento do conteúdo de água torna-se importante

para a obtenção, por exemplo, da condutividade hidráulica do solo não saturado (TEIXEIRA et al., 2005). Na escala de campo o conteúdo de água do solo controla a separação da precipitação em infiltração, evaporação e escoamento, possuindo grande influência na erosão do solo e na descarga dos rios (HUISMAN et al., 2003)

Por exemplo, agrônomos e meteorologistas podem observar a quantidade de água em função da capacidade campo, ecohidrólogos preferem observar a quantidade de água em função da água presente nas regiões das raízes em solos vegetados, enquanto que cientistas que realizam modelagens da zona vadosa estão interessados na informação do perfil de umidade para trabalhos relacionados com a dinâmica da água ou de transportes de solutos.

A quantificação da água do solo deve basear-se numa propriedade física dependente significativamente do seu conteúdo, produzindo uma resposta direta, rápida e confiável. As técnicas de medida do conteúdo da água no solo são normalmente classificadas em diretas e indiretas. Técnicas de determinação direta, como o método gravimétrico, que apesar de ser considerado padrão, normalmente é evitado, pois é demorado, destrutivo e não permite a repetição da amostragem no mesmo local (LIMA et al., 2006). Na determinação indireta, tais como a atenuação de raios gama, sondas de nêutrons e sondas TDR (reflectometria no domínio do tempo), apresentam como desvantagem requererem calibrações *in loco* para aumentar sua acurácia. No entanto, os métodos indiretos são ideais nos estudos de monitoramento da água do solo, devido à praticidade, rapidez e repetibilidade das medidas realizadas em um determinado ponto do perfil do solo (SILVA et al., 2008). Estes autores afirmam que dentre os métodos indiretos, os mais utilizados são: a reflectometria no domínio do tempo (TDR) e frequência no domínio do tempo (FDR) ou técnica por capacitância, que são baseados na constante dielétrica do solo.

A técnica TDR destaca-se por ser um método não destrutivo, portátil e de fácil manuseio (SANTOS et al., 2010). Tommaselli e Bachi (2001) relatam que uma das características mais atrativas da técnica TDR é sua possibilidade de monitorar, contínua e simultaneamente, a umidade volumétrica do solo em vários locais. É de fácil acoplamento a dispositivos coletores de dados, permitindo monitorar o avanço da frente de umedecimento (CECÍLIO et al., 2003) e a redistribuição de água no perfil do solo (TEIXEIRA et al., 2005). Topp et al. (1980) e Or; Wraith (1997) ressaltam que essa técnica destaca-se de outras pela sua exatidão, possibilidade de multiplicação de leituras, repetição sem destruição da amostra de solo e a não emissão de radiação ionizante.

Segundo Santos et al. (2010), a técnica TDR apresenta como desvantagens: o pouco conhecimento sobre o seu comportamento em solos tropicais pois são solos velhos e apresentam

altos teores de argila e matéria orgânica, este é um método ainda pouco estudado nesses solos; a dependência do teor de materiais magnéticos e tipo de solo (mineral ou orgânico); a calibração trabalhosa; a influência dos óxidos de ferro e da massa específica do solo sobre as medidas e o alto custo de aquisição.

A economia de água pode ser alcançada de forma eficiente, aperfeiçoando o manejo de sistemas de irrigação. Como estratégia, pode-se apontar o monitoramento da umidade volumétrica do solo, por meio da técnica TDR. O erro na quantificação da umidade realizado por esta técnica, pode resultar no aumento do uso de água por sistemas de irrigação. A subestimação da umidade pode acarretar em desperdício de água e a superestimação prejudicar o desenvolvimento das culturas com o fornecimento de uma lâmina de água menor que a requerida, podendo ocasionar em prejuízos financeiros devido à queda de produtividade das culturas. Nesse contexto, é imperativo a existência de estudos que avaliem o desempenho dessa técnica na medição correta da umidade.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Avaliar o efeito da dinâmica da água na resposta do sensor tipo TDR de três solos provenientes de três mesorregiões do estado de Pernambuco, com características texturais distintas.

2.2 Objetivos específicos

Este trabalho tem como objetivos específicos:

- 1) Determinar o alcance e a sensibilidade do sensor de umidade CS616 tipo TDR.
- 2) Avaliar o desempenho do sensor de umidade para solos do estado de Pernambuco, através da equação quadrática fornecida pelo fabricante.
- 3) Calibrar o sensor de umidade, afim de propor equações que otimizem o desempenho deste sensor para os solos estudados.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Água

A água, é um dos mais simples compostos químicos naturais, é vital para as células e as propriedades únicas desse composto promovem uma grande variedade de processos físicos, químicos e biológicos (BRADY; WEIL, 2008). De toda água existente no mundo apenas em torno de 2,5% é doce, sendo que o homem tem acesso a apenas 0,001% desse total, pois parte está congelada e parte em reservas subterrâneas (ALBUQUERQUE; DURÃES, 2008). A água é uma das mais importantes substâncias da crosta terrestre, além de ser um fator fundamental para a produção vegetal e a sua falta ou excesso afetam de maneira decisiva o desenvolvimento das plantas (REICHARDT; TIMM, 2004).

A crescente demanda de água para os diversos fins, torna o manejo de água, um sério e complexo problema presente em todas as regiões do planeta, por isto é de significativa importância obter-se a maior eficiência possível no uso da água pelas culturas, esta ação se torna necessária para regiões que apresentam problemas de falta de chuva e para região onde a chuva é suficiente porém apresenta problemas de distribuição que acarretam na existência de tempos de falta de água (REICHARDT, 1987).

O principal reservatório de água é o solo que, temporariamente, armazena água, podendo fornecê-la às plantas à medida de suas necessidades. Como a recarga deste reservatório é inconstante, o volume disponível às plantas é variável (REICHARDT, 1985).

3.1.1 A Importância da água para a produção vegetal

A água se destaca por assumir um papel fundamental no desenvolvimentos das plantas na produção agrícola das espécies cultivadas. A limitação da produção agrícola mundial está diretamente relacionada à frequência e intensidade do déficit hídrico a que são submetidas as espécies cultivadas (SANTOS; CARLESSO, 1998).

A água afeta vários processos fisiológicos das plantas, como o crescimento e o desenvolvimento das plantas, se tornando fundamental para a estrutura das moléculas biológicas e para as células, tecidos e o organismo vegetal como um todo (KLAR, 1988), a importância da água, pode-se evidenciar no que se diz respeito à composição dos tecidos vegetais, como por exemplo na constituição da parede celular a água representa em até 50% do

seu conteúdo, no protoplasma 95% do peso total, no vacúolo 98% do volume e no sistema vascular se mostra muito presente na composição da solução no xilema e floema (REICHARDT, 1985). A água é um dos constituintes primários na produção vegetal, presente nos processos bioquímicos da planta e isto é evidenciado no processo de fotossíntese, a partir do qual as plantas são capazes de capturar a energia luminosa e usá-la para transformar água e CO₂ em uma forma química útil (carboidratos) através de reações que ocorrem nas folhas (LIETH; OKI, 2008).

O efeito do déficit hídrico em determinados tempos de desenvolvimento da planta afeta os índices fisiológicos de crescimento vegetal, como a inibição da atividade fotossintética, o decréscimo da área foliar e biomassa, o processo transpiratório e resistência estomática além de poder afetar diretamente a produção (BERGAMASHI et al., 2006).

3.2 Solo

O solo que classificamos é uma coleção de corpos naturais, constituídos de partes sólidas, líquidas e gasosas, tridimensionais, dinâmicos, formados de material orgânico e mineral. Ocupam a maior parte do manto superficial das extensões continentais do nosso planeta, contém matéria viva e podem ser vegetados na natureza, onde ocorrem. Ocasionalmente podem ter sido modificados por atividades humanas. Este é o conceito de solo que é utilizado pelo Sistema Brasileiro de Classificação das Terras para Irrigação (SiBCTI) que é basicamente o mesmo utilizado no Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS). Assume-se que o solo é o reservatório da água a ser utilizada pelas espécies vegetais, o qual temporariamente a armazena, podendo disponibilizá-la às plantas conforme suas necessidades (REICHARDT e TIMM, 2004).

Abordando a definição física do solo, onde o mesmo se apresenta como um sistema trifásico, em que a fase sólida é constituída pelas partículas que compõem a matriz do solo, a fase líquida é constituída pela água ou solução do solo e a fase gasosa pelo ar e pelo vapor de água. Segundo Klar (1984) sob o ponto de vista físico o solo pode ser definido como um sistema poroso constituído por partículas sólidas, líquidas e gasosas, e volumes de vazios, que podem ser ocupados pelo ar e pela água, sendo portanto um armazenador de água e nutrientes para as plantas. Bernardo et al. (2006) afirmam que o volume de sólidos pode ser considerado praticamente fixo, enquanto os gases e a solução (água e nutrientes) dividem o espaço poroso do solo. Se a quantidade de solução ou a umidade do solo aumentar, diminui a quantidade de

gases, e vice-versa. Com isto pode-se afirmar, que existem duas condições distintas para a fase líquida do solo, ou seja, quando o volume total de poros estiver totalmente ocupado por água denominado solo saturado ou parcialmente ocupado por água denominado solo não saturado.

3.2.1 Textura do solo

O termo textura refere-se a distribuição das partículas do solo tão somente quanto ao seu tamanho. Cada solo recebe uma designação referente à sua textura, designação essa que nos dá uma ideia do tamanho das partículas constituintes mais frequentes. Tradicionalmente, as partículas do solo são divididas em três frações de tamanho, chamadas frações texturais: areia, silte e argila (ALBUQUERQUE; DURÃES, 2008). Propriedades físicas dos solos estão diretas ou indiretamente, associadas à textura, como por exemplo, o movimento e a retenção de umidade, influenciando diretamente na dinâmica da água no solo.

As partículas minerais do solo apresentam propriedades e comportamentos bastante distintos. A fração areia, em função do maior tamanho, permite maior permeabilidade à água e ao ar no solo, mas baixa capacidade de retenção de água e são consideradas não-coesivas. A fração silte possui poros menores e mais numerosos, retendo mais água e menor taxa de drenagem do que areia. A argila, em função do reduzido diâmetro, apresenta grande área superficial específica, o que acarreta elevada retenção de água e fluxo lento de ar e água, além de elevada plasticidade quando úmida e alta coesão, quando seca (BRADY; WEIL 2008). Para Reichardt e Timm (2004), a argila é a fração do solo que mais influencia o seu comportamento físico do solo.

3.2.2 Massa específica

Os solos apresentam grande amplitude de massa específica (ρ_s) em função de suas características mineralógicas, de textura e de teor de matéria orgânica. Solos arenosos apresentam valores de massa específica superior aos argilosos, enquanto que solos siltosos apresentam densidade intermediária (LIBARDI, 2005). Solos argilosos apresentam agregação das partículas de argila, da qual resulta a porosidade intra-agregados, que aumenta o volume do espaço poroso, principalmente aqueles poros com diâmetro reduzido (BRADY; WEIL 2008). A ρ_s conforme Klein (2008), é uma relação entre massa de solo seco e seu volume, sendo, portanto afetada por modificações na estrutura e no arranjo das partículas do solo.

$$\rho_s = \frac{m_s}{V_t} \quad (1)$$

Na qual m_s é a massa de solo seco expressa em unidade de massa (g) e V_t é o volume total do solo expresso em unidade de volume (cm^3) e ρ_s é expressa em g.cm^{-3} .

3.3 Umidade do solo

Um dos fatores mais importantes para o controle dos processos hidrológicos é a umidade do solo, visto que influencia na geração do escoamento superficial, na evaporação da água do solo, na transpiração das plantas e em uma série de interações geográficas e pedogênicas (ÁVILA et al., 2010). As propriedades do solo, as práticas culturais, o manejo do solo, a quantidade e intensidade de aplicação de água e o estágio de desenvolvimento das culturas são fatores que afetam a umidade do solo (PALTINEANU; STARR, 1997). A umidade do solo varia com o tempo, aumentando com a chuva, ascensão capilar ou com a irrigação e diminuindo com a drenagem ou evapotranspiração (REICHARDT, 1987)

Segundo Albuquerque e Durães (2008) a medição do conteúdo da água do solo em condições de campo é difícil de ser realizada, por conta de uma série de fatores, tais como: o crescimento desigual das plantas e a desuniformidade da distribuição do sistema radicular; diferenças em características de infiltração; a variabilidade do solo com relação à estrutura, à estratificação e à textura; mudanças na densidade do solo, variação do volume de poros e da distribuição de tamanho de poros; desigualdades no relevo; desuniformidade inerente à irrigação. Portanto, o teor de água no solo está sujeito a variabilidade temporal, uma vez que o sistema solo-água é dinâmico, tanto no perfil do solo quanto na área (ALBUQUERQUE; DURÃES, 2008). As variações espaciais dos mais diversos atributos físicos, condicionam a distribuição de água no solo e conseqüentemente influenciam no rendimento das culturas. Assim, a medição da umidade do solo é essencial para a pesquisa e entendimento do comportamento de distribuição da água no mesmo (SIQUEIRA, 2006).

Conhecer o conteúdo da água do solo de uma determinada região ou de um perfil de solo, é de grande importância para fornecer tomadas de decisões, como escolha do manejo de irrigação, projetos de drenagem e estudos do processo solo-planta-atmosfera. Assim, a determinação da umidade do solo é essencial para estudos de movimento e disponibilidade de água no solo, erosão, manejo da irrigação, dentre outros processos (BERNARDO et al., 2006).

Por ser fundamental no desenvolvimento das plantas e apresentar várias implicações nas propriedades físicas do solo, a determinação do teor de água do solo é de grande interesse nos aspectos científicos e econômicos. Para se determinar o conteúdo de água do solo existem

vários métodos e técnicas e as principais diferenças entre os métodos resumem-se a forma de medição, local de medição, instalação, preço, tempo de resposta e, operacionalidade no campo (MANTOVANI et al. 2009)

O conteúdo da água do solo corresponde a uma relação entre massas ou entre volumes de uma dada amostra de solo, sendo normalmente expressa de duas maneiras (LIBARDI, 1999).

Umidade à base de massa ou Umidade gravimétrica (θ_g)

$$\theta_g = \frac{m_a}{m_s} \quad (2)$$

Umidade à base de volume ou Umidade volumétrica (θ_v)

$$\theta_v = \frac{V_a}{V_t} \quad (3)$$

de (2) e (3) obtêm-se que:

$$\theta_v = \theta_g \cdot \rho_s \quad (4)$$

os termos m_a e V_a , m_s e V_t representam, respectivamente, a massa e o volume de água em uma amostra de solo, a massa de solo seco, volume total do solo e ρ_s a massa específica do solo (g.cm^{-3}). A umidade gravimétrica (g.g^{-1}) e a umidade volumétrica ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$) são grandezas adimensionais, mas suas unidades devem ser mantidas, já que ambas apresentam valores de materiais diferentes (REICHARDT, 1985).

Existem diversas maneiras de se quantificar o conteúdo da água do solo, que podem ser denominadas de métodos diretos e métodos indiretos. Dentre os métodos diretos como: método gravimétrico; método determinador de umidade por equivalência de água (DUPEA) e o método das pesagens, o gravimétrico é o mais utilizado, e é o método-padrão para calibração dos métodos indiretos. Os principais métodos indiretos, que são métodos que se baseiam nas propriedades físicas e químicas dos solos que estão estreitamente relacionadas ao conteúdo de água, baseiam-se em medidas como a moderação de nêutrons, a resistência do solo à passagem de corrente elétrica, a constante dielétrica do solo e a tensão da água no solo. Essas são características do solo que variam com a sua umidade. Os métodos indiretos requerem calibrações (HILLEL, 1980).

3.3.1 Métodos diretos de determinação da umidade do solo

Os métodos diretos envolvem alguma forma de remoção ou separação da água do solo com a medida direta dessa água, que pode ser obtido por aquecimento ou pela utilização de solvente ou reação química (MANIERE et al., 2007).

3.3.1.1 Método padrão de estufa

Este que é um método termogravimétrico, ou seja, o conteúdo de água no solo é quantificado, com base na diferença entre a massa de uma amostra de solo obtida antes e após secagem da mesma em uma estufa a 105-110°C, até massa constante (MUÑOZ-CARPENA et al., 2005) sendo possível calcular a umidade gravimétrica do solo obtida com a Equação 2.

As amostras de solo utilizadas nesta metodologia são retiradas na profundidade em que se deseja determinar a umidade, sendo acomodadas geralmente em recipientes de alumínio, podendo ter a sua estrutura deformada ou não, porém evitando-se a evaporação da água no momento de coleta, conservando-se a umidade antes da pesagem da amostra úmida (REICHARDT, 1985). Segundo Vielmo (2008), o método padrão da estufa, além de possuir boa precisão e ser utilizado como referência para a calibração de outros equipamentos para estimativa da umidade do solo, apresenta baixo custo de realização, não necessitando de equipamentos sofisticados e ou adição de produtos químicos. Entretanto, dentre algumas desvantagens associadas ao método estão o seu caráter destrutivo, não permitindo a repetibilidade da medida em um mesmo ponto, além do tempo de espera (até dois dias) relacionado à determinação do teor de água no solo.

3.3.2 Métodos indiretos de determinação da umidade do solo

Em condições de campo, a estimativa do conteúdo de água do solo, a respeito do método utilizado, é de difícil realização em função de uma série de fatores, particularmente, devido ao comportamento dinâmico da fase líquida na sua redistribuição no perfil do solo (BRAGANÇA et al., 2005). Entretanto, em função das dificuldades envolvidas na determinação pontual da umidade do solo pelos métodos diretos, os quais são destrutivos e não permitem a repetibilidade das medidas, geralmente utilizam-se métodos indiretos para esta finalidade (MIRANDA et al., 2007).

Diferentemente dos métodos diretos, segundo Gardner et al. (2000), as medidas feitas por métodos indiretos dependem do monitoramento de uma propriedade do solo que é função ou possui relação com o seu conteúdo de água. Neste sentido, os principais métodos indiretos para a estimativa do teor de água no solo se fundamentam em parâmetros como a tensão da água no solo, a resistência do substrato à passagem de corrente elétrica, a moderação de nêutrons e a permissividade elétrica relativa do meio.

Os métodos indiretos são os mais indicados nos estudos de monitoramento de água no solo, devido à praticidade, rapidez e possibilidade de repetição das medidas em um determinado ponto do perfil do solo ressalta-se também que, por conta das suas características vantajosas para o monitoramento da água no solo, estes métodos são bastante utilizados em pesquisas e sistemas de agricultura de precisão (SILVA et al., 2008).

Para as condições de campo, Muñoz-Carpena et al. (2005) classificam os métodos indiretos para medida da umidade do solo em tensiométricos e volumétricos. Os métodos definidos como tensiométricos estimam o potencial mátrico da água no solo, o qual inclui os efeitos de adsorção e capilaridade da fase sólida do solo, enquanto os métodos volumétricos estimam o volume de água por unidade de solo ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$).

3.3.2.1 Tensiômetro

A tensiometria é uma das técnicas de monitoramento da quantidade de água no solo mais acessíveis (MACEDO, 2008), este método utiliza sensores chamados de tensiômetros, que medem a umidade do solo, indiretamente, através da tensão de retenção da água do solo no local especificado. O tensiômetro, sendo o instrumento mais utilizado no campo para a medida do potencial mátrico da água no solo, é um equipamento composto por uma capsula porosa de cerâmica ligada por meio de um tubo a um vacuômetro ou coluna de mercúrio, onde a tensão com a qual a água está retida pela matriz do solo é lida (BERNARDO et al., 2006)

Os tensiômetros foram desenvolvidos em 1922 por Gardner e colaboradores, possibilitando a obtenção direta do potencial de água no solo, e de forma indireta o conteúdo de água do solo (COELHO e TEIXEIRA, 2004). Tal instrumento consiste de uma câmara, geralmente de PVC, preenchida com água, apresentando na sua extremidade inferior uma cápsula porosa de cerâmica, e na extremidade superior um manômetro (KLAR, 1984; REICHARDT e TIMM, 2004). As cápsulas porosas utilizadas nos tensiômetros apresentam uma porosidade que forneça pressão de borbulhamento mínima de 0,1 MPa (100 kPa),

possibilitando uma alta e uniforme condutância (LIBARDI, 1995). A câmara, por ser hermeticamente fechada, não permite a entrada de ar.

Assim, estes aparelhos medem o componente matricial do potencial de água no solo, sendo seus valores expressos em centibars (cbar), atmosfera (atm), metro ou centímetro de coluna de água (cm. H₂O), ou ainda, milímetro de mercúrio (mmHg) ou quilopascal (kPa) (REICHARDT, 1996).

O princípio de funcionamento deste instrumento está baseado no equilíbrio entre a água no interior do tubo do tensiômetro e a solução do solo. Após o estabelecimento deste equilíbrio e, na medida em que a umidade na camada do perfil vai reduzindo, a água do interior do tensiômetro atravessa a capsula porosa, diminuindo a pressão interna do equipamento. Isto se dá devido à redução do potencial de água no solo em comparação com o potencial da cápsula, criando um vácuo, em virtude de o instrumento ser vedado, equivalente ao potencial mátrico, que pode ser então mensurado (BRITO et al., 2009).

Para o funcionamento adequado do tensiômetro é necessário que haja uma continuidade hidráulica desde a membrana porosa até o manômetro, além da ausência de ar aprisionado no interior do tensiômetro (KLAR, 1984).

Dentre os diferentes sistemas de leitura, os tensiômetros clássicos ou convencionais utilizam o manômetro de mercúrio, o qual é mais preciso em comparação ao manômetro metálico, mas exige maior cuidado de manuseio, aquisição e uso do mercúrio (BERNARDO et al., 2006). Porém, têm-se difundido a utilização de tensiômetro digital em tensiômetros de punção, além do desenvolvimento de tensiômetros eletrônicos, ou seja, que possibilitam leitura e gravação automática das informações, a exemplo daqueles que possuem transdutores de pressão. Estes, porém, possuem custo elevado, sendo o seu uso restrito apenas para fins de pesquisa (COELHO e TEIXEIRA, 2004).

Além da determinação direta da tensão de água no solo, a utilização do tensiômetro para medida indireta da umidade é realizada a partir da determinação da curva de retenção de água no solo. Esta tem como base o potencial mátrico da água no solo, o qual pode ser avaliado pelo trabalho que se deve realizar à unidade de volume de água retida num solo não saturado pelas forças mátricas e torná-la livre, como a água padrão (LIBARDI, 2010). Desta forma, a curva de retenção resulta da correlação entre o potencial mátrico e o conteúdo de água no solo.

Uma das vantagens do uso de tensiômetros é caracterizada pelo fato de este não ser afetado pela salinidade do solo, pelo motivo de os sais serem capazes de se mover com facilidade através da capsula porosa de cerâmica (MUÑOZ-CARPENA et al., 2005)

Os tensiômetros apresentam como desvantagens a necessidade constante de manutenção, além da limitação das leituras dos aparelhos não podendo ultrapassar 0,75 atm (76 kPa), razão pela qual ele cobre apenas uma parte da água útil do solo, sendo 40% e 70%, nos solos argilosos e arenosos, respectivamente. O surgimento de bolhas de ar no sistema quando próximo a 0,8 atm (81,06 kPa) é tida como responsável pelo atraso na resposta do aparelho e recomenda a utilização de água livre de ar (OLITTA, 1955).

3.3.2.2 Método de Bouyoucos

Dentre os métodos tensiométricos, destaca-se o método de Bouyoucos, ou denominado sensor de bloco de gesso. Um sensor de bloco de gesso apresenta em sua constituição uma célula eletroquímica com uma solução saturada de sulfato de cálcio como eletrólito (MUÑOZ-CARPENA et al., 2005). O princípio de funcionamento deste método é baseado na resistência elétrica entre dois eletrodos inseridos em um bloco de gesso, a qual é determinada por uma ponte de Wheatstone e aplicação de uma pequena voltagem de corrente alternada, dando uma indicação indireta da umidade do bloco e, portanto, do conteúdo de água no solo (VIELMO, 2008). Isto ocorre devido aos blocos de gesso, a fim de atingir o equilíbrio com a solução do solo, variando de acordo com a umidade deste. Por conseguinte, a resistência elétrica entre os eletrodos de cada bloco varia em função do seu conteúdo de água, sendo uma menor ou maior resistência observada em ocasião de maior ou menor quantidade de solução, respectivamente (BERNARDO et al., 2006).

O medidor da resistência elétrica é calibrado para leituras diretas de percentagem de água no solo, ou seja, em termos de água disponível, uma leitura de 0% indica um valor de umidade próximo ao ponto de murcha permanente, enquanto uma leitura de 100% corresponde a um valor de conteúdo de água no solo próximo a capacidade de campo (BERNARDO et al., 2006).

As desvantagens do método estão relacionadas à dissolução dos blocos com o tempo (especialmente em solos salinos) e deposição de argila. É recomendado também que a distribuição do tamanho de poros dos blocos seja equivalente a textura do solo circundante com o qual está em contato (MUÑOZ-CARPENA et al., 2005). O método, demonstra a necessidade de correção dos valores da resistência elétrica medida em campo, em função das leituras serem influenciadas pela temperatura. Outra desvantagem está associada ao efeito de histerese na acurácia das medidas, devido os sensores de bloco de gesso mostrarem diferentes valores de

resistência para um valor fixo de potencial de água no solo quando este está umedecendo ou secando.

Contudo, o método de Bouyoucos é caracterizado como simples, barato e de fácil fabricação e manejo, podendo ser utilizado para o controle de irrigação. Porém, por não possuir alta precisão para a utilização em pesquisas, deve-se realizar a sua calibração em campo, utilizando um método padrão, em função do percentual de umidade para cada solo em específico (VIELMO, 2008).

3.3.2.3 Moderação de nêutrons e atenuação da radiação gama

A determinação da umidade do solo a partir da técnica de moderação de nêutrons é baseado no processo de perda de energia das partículas de nêutrons, passando de rápidos para lentos através do uso das sondas de nêutrons, tem sido aplicado com sucesso desde a década de 1960 (REICHARDT e TIMM, 2004).

A sondas de nêutrons é basicamente constituída de uma fonte de nêutrons rápidos e um detector de nêutrons lentos, além de um contador de pulso, um cabo conector e blindagem (BELL, 1987).

O princípio básico de funcionamento das sondas de nêutrons, diz respeito à correlação estreita entre a quantidade de nêutrons moderados a ser medida no aparelho e a concentração de hidrogênio presente no solo (BERNARDO et al., 2006). A utilização das sondas de nêutrons, algumas vezes em associação a outros métodos indiretos, com a finalidade de estimativa de umidade do solo, tem sido relatada em diversos estudos (NASCIMENTO, 2013). As curvas de calibração das sondas de nêutrons devem ser obtidas para cada profundidade do solo a ser considerada e para cada tipo de solo.

O método apresenta algumas vantagens dentre elas se destaca o fato do método ser de natureza não destrutiva, possibilitando a repetibilidade da medida de umidade num mesmo local, que mantém a sua estrutura após a instalação dos tubos de acesso (VIELMO, 2008). Uma desvantagem que se pode destacar é a restrição ao uso das sondas de nêutrons, em função da sua fonte radioativa, representando um risco de contaminação.

Outra técnica nuclear de estimativa da umidade volumétrica do solo, a qual está relacionada também à medida de densidade deste substrato, consiste no emprego de sondas gama-nêutron de superfície (REICHARDT e TIMM, 2004). Outra aplicação do método, descrita por Bacchi, et al. (1998), diz respeito a determinação de curvas de retenção de água no solo. A técnica está relacionada à absorção de um feixe colimado de radiação gama, de

intensidade I_o (antes de atravessar o solo), o qual é proporcional à massa específica do solo (ρ_s), à umidade θ e à espessura x de uma amostra (REICHARDT e TIMM, 2004).

3.4 Métodos dielétricos

Os métodos de estimativa da umidade que recebem esta classificação apresentam como característica comum um princípio de funcionamento baseado na determinação da constante dielétrica (K) do solo, o que os físicos denominam de permissividade elétrica relativa do meio (ϵ_r):

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad (5)$$

Na qual ϵ é a permissividade elétrica do meio, e ϵ_0 é a permissividade elétrica no vácuo. Como o solo se constitui de um sistema trifásico (partículas sólidas, água e ar), o valor da constante dielétrica deste substrato é denominada pelos cientistas do solo de constante dielétrica aparente (K_a), conhecido como permissividade elétrica relativa efetiva (ϵ_f). Pelo fato de que cada fase do solo tem uma constante dielétrica diferente, à medida que os poros são preenchidos com água o valor de K_a varia de forma significativa uma vez que a constante dielétrica da parte sólida está entre 3 e 5 (SOUZA et al., 2006), e a da água é aproximadamente 80 vezes maior que a constante dielétrica do ar ($K_{ar} \approx 1$).

Silva, et al. (2008) destacam que, dentre os métodos indiretos baseados na constante dielétrica do solo (K_a), os mais utilizados são o TDR ou reflectometria no domínio do tempo (*Time Domain Reflectometry*) e FDR ou reflectometria no domínio da frequência (*Frequency Domain Reflectometry*) denominada também de técnica por capacitância.

3.4.1 Método da reflectometria no domínio do tempo – TDR

A técnica da Reflectometria no Domínio do Tempo foi inicialmente empregada pelas companhias telefônicas e de energia elétrica para localizar onde as linhas de transmissão foram interrompidas. Desde o final do século passado a técnica TDR tem sido utilizada para obter o teor de água no solo, e também na medida de níveis de lençóis freáticos (HUANG; DOWDING, 1998). O princípio da medida da umidade do solo pela técnica da TDR foi pioneiramente introduzida por Davis e Chudobiak (1975) e implementado e validado por Topp et al. (1980).

De acordo com Kaiser et al. (2010), a técnica de TDR foi inicialmente introduzida para a medida de propriedades dielétricas de líquidos e a partir de 1980, passou a ser considerada promissora em ciência do solo.

A descrição da técnica TDR tem como base a teoria da propagação do campo eletromagnético e por isso há também uma descrição que utiliza circuitos elétricos distribuídos (SANTOS, 1997). De fato, as ondas eletromagnéticas se propagam em meios materiais com diferentes velocidades, v , dependendo da permissividade elétrica relativa, ϵ_r , e da permeabilidade magnética relativa μ_r e a partir das equações de Maxwell tem-se que:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r \cdot \mu_r}} \quad (6)$$

Na qual c é a velocidade da luz no vácuo. Considerando que o solo a ser analisado pelo método TDR tenha uma quantidade de elementos magnéticos suficientemente pequenos, de modo que a permeabilidade magnética seja aproximada para a permeabilidade do vácuo, então $\mu_r \approx 1$, e tem-se que:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (7)$$

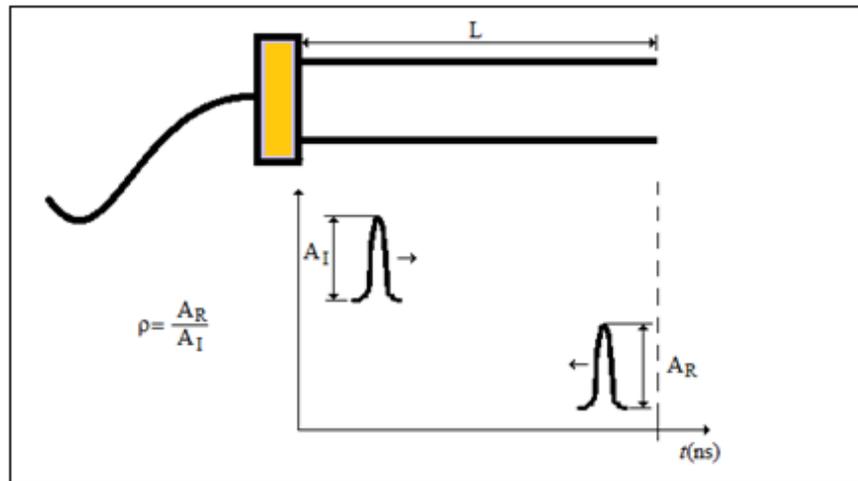
Uma das formas de analisar a propriedade dielétrica do solo com a técnica TDR é inserindo duas hastes metálicas paralelas de comprimento L , que funcionarão como guia de ondas ou linha de transmissão curta, e injetar um pulso eletromagnético, via gerador de sinais, no início das hastes, para então medir o tempo de propagação t que esse pulso leva para percorrer as hastes. Na realidade, como o guia de ondas é finito, então o sinal de pulso será refletido na distância L (COLLIN, 1992), e retorna ao início das hastes onde está conectado um sistema eletrônico de aquisição de sinais elétricos ou osciloscópio digital. O procedimento acima descrito é ilustrado na Figura 1. Assim, a velocidade de propagação do pulso pode ser dada por:

$$v = \frac{2L}{t} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (8)$$

igualando as Equações 7 e 8, pode-se então determinar a permissividade relativa do solo em função dos parâmetros conhecidos e medidos, pois quanto mais úmido o solo se apresenta maior é o tempo de trânsito do pulso no guia de ondas:

$$\varepsilon_r = \left(\frac{ct}{2L} \right)^2 \quad (9)$$

Figura 1 - Propagação de um pulso elétrico no guia de ondas, onde ρ representa o coeficiente de reflexão em função da amplitude de incidência e refletida do pulso.



Fonte: SANTOS (2013).

Observa-se que, na prática, os tempos de propagação dos sinais elétricos no guia de ondas (por vezes denominado de sonda) é da ordem de nano-segundos e quando se encontra saturado o tempo máximo, para uma sonda de comprimento de 1 m, pode atingir 20ns, dependendo do tipo de solo. Isso demonstra que para medição de tais tempos faz-se necessário instrumentação eletrônica sofisticada como os modernos osciloscópios digitais e geradores de pulso com frequências da ordem de GHz. Ou seja, a largura do pulso elétrico tem que ser no máximo da ordem de centenas de pico-segundos para poder haver resolução temporal e ser possível conseguir medir o tempo de propagação, sobretudo para as sondas cujo comprimento é da ordem de centímetros, já que em solos secos o tempo de propagação para uma sonda de 15 cm é da ordem de 0,9 ns (SANTOS, 1997). É importante notar que o método TDR é muito bom para se medir tempos de propagação do pulso em meios materiais homogêneos ao longo do guia de ondas ou linha de transmissão, como é o caso em redes de distribuição da energia elétrica. No caso do solo, que é poroso e não necessariamente tem uniformidade, pode haver, por exemplo, seixos ou materiais magnéticos que produzirão efeitos que podem conduzir a valores incorretos no processo de medição da permissividade elétrica relativa efetiva (ε_f) do meio. Além disso, um meio não uniforme produz o efeito de múltiplas reflexões do sinal, como descrito por SANTOS (1997), ou seja, a amplitude do pulso refletido será diferente do pulso incidente o que pode causar interpretações incorretas no medida do tempo.

É importante salientar que a constante dielétrica medida para um solo é uma média ponderada das constantes dielétricas das frações dos componentes do solo, ou seja, das fases sólida, líquida e gasosa. Como a constante dielétrica da água é de aproximadamente 80, do ar 1 e do material sólido (mineral e orgânico) de 3 a 7, uma pequena variação na umidade volumétrica do solo (θ_v) causará uma mudança considerável da constante dielétrica aparente. Por meio de uma correlação experimental entre a constante dielétrica medida com o TDR e a umidade volumétrica do solo, pode-se, portanto, utilizar a técnica de TDR para a determinação da umidade do solo (TOPP et al. 1980).

Topp et al. (1980) estabeleceram a equação universal (Equação 10) como independente da massa específica do solo seco. No entanto, isso nem sempre é verdade e deve ser lembrado, também, que a constante dielétrica é, em geral, sensível à presença de materiais magnéticos e de solutos no solo, tendo em vista os diferentes tipos de solo. A grande dificuldade em usar o TDR antes de qualquer estudo ou determinação de dados físicos, é justamente a necessidade da determinação da curva de calibração do solo a ser utilizada em experimentos de campo (MINELLA et al., 1999). Villwock et al. (2004) afirma que a calibração é exigida especialmente quando se trabalha com Latossolos, devido a algumas particularidades, como, por exemplo, os altos teores de Fe e argila e a expansibilidade do solo.

$$\theta_v = -5,3 \cdot 10^{-2} + 2,92 \cdot 10^{-2} k_a - 5,5 \cdot 10^{-4} k_a^2 + 4,3 \cdot 10^{-6} k_a^3 \quad (10)$$

Na qual, θ_v é a Umidade Volumétrica expressa em $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$, k_a é a constante dielétrica aparente do solo.

Para solos brasileiros, Tommaselli e Bacchi (2001) mostraram que em cinco tipos de solos (Areia Quartzosa, Podzólico Vermelho-Amarelo, Latossolo Vermelho-Amarelo, Terra Roxa Estruturada e Latossolo Vermelho-Escuro) na região de Piracicaba-SP, a curva genérica (Topp et al., 1980) e a curva embutida no equipamento Trase I não são aplicáveis aos solos estudados. Resultados semelhantes foram obtidos por Minella et al. (1999) num Latossolo do município de Foz do Iguaçu-PR. O instrumento TDR já tem embutida, em seu sistema, a equação gerada por Topp et al. (1980) para solos americanos mas, com base em determinações e observações de campo, Silva e Gevásio (1999) suspeitaram do uso de tal equação para os solos brasileiros, decidindo-se por elaborar uma equação específica para cada um dos diferentes tipos de solo encontrados no país.

Roth et al. (1992), comparando diferentes solos, constataram que a densidade do solo desempenha papel importante na relação da constante dielétrica *versus* a umidade do solo.

Malicki et al. (1996), utilizando diferentes materiais porosos, inclusive solo, demonstraram que a densidade, assim como a porosidade, influenciam na relação entre a constante dielétrica e a umidade do solo e que os erros das estimativas foram contornados quando os efeitos dessas variáveis foram considerados na função de calibração. Também Schaap et al. (1996) obtiveram melhores estimativas de umidade em solos florestais, levando-se em conta o efeito da densidade na curva de calibração da TDR.

De acordo com Trintinalha (2000) existe influência da compactação do solo sobre as leituras de um equipamento TDR e o mesmo concluiu que a massa específica do solo exerce influência sobre os valores da constante dielétrica dos solos lidos pelo aparelho e que, portanto, o modelo de calibração deve incluir a variável massa específica do solo. Segundo Gonçalves et al (2011), as modificações na estrutura do solo expressas pelo aumento da densidade e redução da porosidade podem alterar a constante dielétrica do solo para determinado valor de umidade do solo, o que pode implicar em mudanças na curva de calibração da TDR.

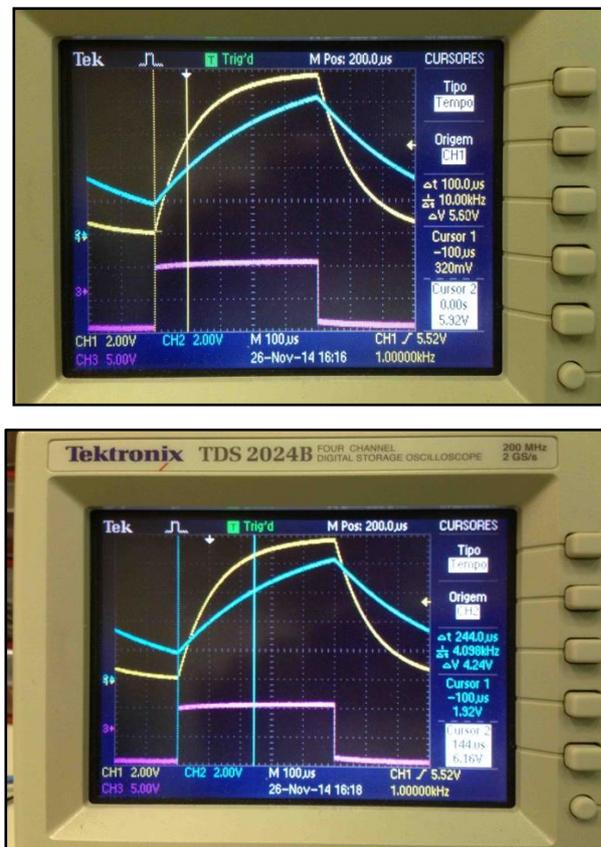
Coelho et al. (2006), trabalhando com amostras que apresentavam pequenas diferenças nas características físicas, no que diz respeito à porosidade, densidade e textura, não encontraram alteração na constante dielétrica do solo. Portanto, a realização de mais trabalhos nesse contexto com solos de características físicas bem distintas é importante para melhor compreensão sobre a real influência das características físicas na constante dielétrica (SANTOS et al., 2010). Topp et al., (1980) afirmaram que variáveis como texturas, densidade, estrutura, teor de sais solúveis, temperatura e frequência da ondas eletromagnética utilizada afetam os resultados do sensor.

3.4.2 Método da medição pela capacitância elétrica da sonda

Pode-se utilizar outra técnica para analisar a propriedade dielétrica do solo uma vez que a sonda, do ponto de vista de circuitos elétricos, é um capacitor cujo dielétrico consiste no próprio solo entre as hastes paralelas. Isto permite que se avalie o tempo de carga e descarga do capacitor, injetando sinais elétricos de grau positivo e negativo, respectivamente, como descrito na teoria de circuitos elétricos (PARIS; HURD, 1984). Na prática, isso corresponde a um sinal periódico tipo onda quadrada cuja frequência a ser utilizada depende do comprimento da sondas e dos valores limites de capacitância para solo saturado e seco. Em geral, essa técnica opera com frequências que variam entre kHz e MHz, e com isso é possível se ter circuitos eletrônicos mais simples e de baixo custo (SANTOS, 2013).

Tempos de carga e descarga de circuito com capacitância equivalente a solos secos e saturados provenientes de um osciloscópio digital são apresentados na Figura 2. Observamos que a curva em que se representa um solo seco (em amarelo) o tempo de carregamento é da ordem de $100\ \mu\text{s}$, enquanto que a curva que representa um solo úmido (em azul) o tempo de carregamento é de $244\ \mu\text{s}$. Assim, para cada valor de umidade do solo corresponderá um intervalo de tempo e pode-se então determinar uma curva de calibração da umidade do solo em função do tempo em que as sondas levam para atingir uma tensão (V_c) pré-estabelecida internamente pelo circuito eletrônico.

Figura 2 - Sinais de carga e descarga elétrica para capacitâncias equivalentes a solos seco ($100\ \mu\text{s}$ - amarelo) e saturado ($244\ \mu\text{s}$ - azul).



Fonte: O AUTOR(2015).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Coleta dos solos

As coletas em campo foram realizadas na zona da mata, agreste e sertão do estado de Pernambuco. Em cada área foi coletado um tipo de solo. A escolha dessas áreas para a realização das coletas, é devido as condições ambientais e características texturais de solo serem bem distintas.

A coleta realizada no município de São João foi realizada na profundidade de 0 a 20 cm. No município de Serra Talhada, a coleta foi realizada na profundidade de 40 a 60 cm. Na zona da mata, a coleta foi no Departamento de Energia Nuclear – UFPE, localizado no município de Recife, na profundidade de 0 a 20 cm.

Amostras de solo indeformadas, foram coletadas para determinação da massa específica e amostras deformadas para determinar suas composições granulométricas, as análises foram conduzidos no laboratório de Física de solos no Departamento de Energia Nuclear da UFPE.

4.2 Caracterização da área de coleta dos solos

4.2.1 São João

A primeira coleta foi realizada em solo classificado como Neossolo Regolítico Eutrófico Típico (SANTOS et al., 2012). O ponto de coleta está localizado na Fazenda Papagaio, do município de São João-PE, este município que faz parte da mesorregião do Agreste meridional do estado de Pernambuco (Figura 3), com coordenadas geográficas 8° 52' 30'' de latitude sul, 36° 22' 00'' de longitude oeste e altitude de 705 m. O clima predominante na região é o As', que equivale a um clima quente e úmido, conforme classificação de Köppen. A precipitação pluvial anual média é de 782 mm, sendo o quadrimestre mais chuvoso constituído dos meses de maio a agosto (APAC, 2013).

4.2.2 Serra Talhada

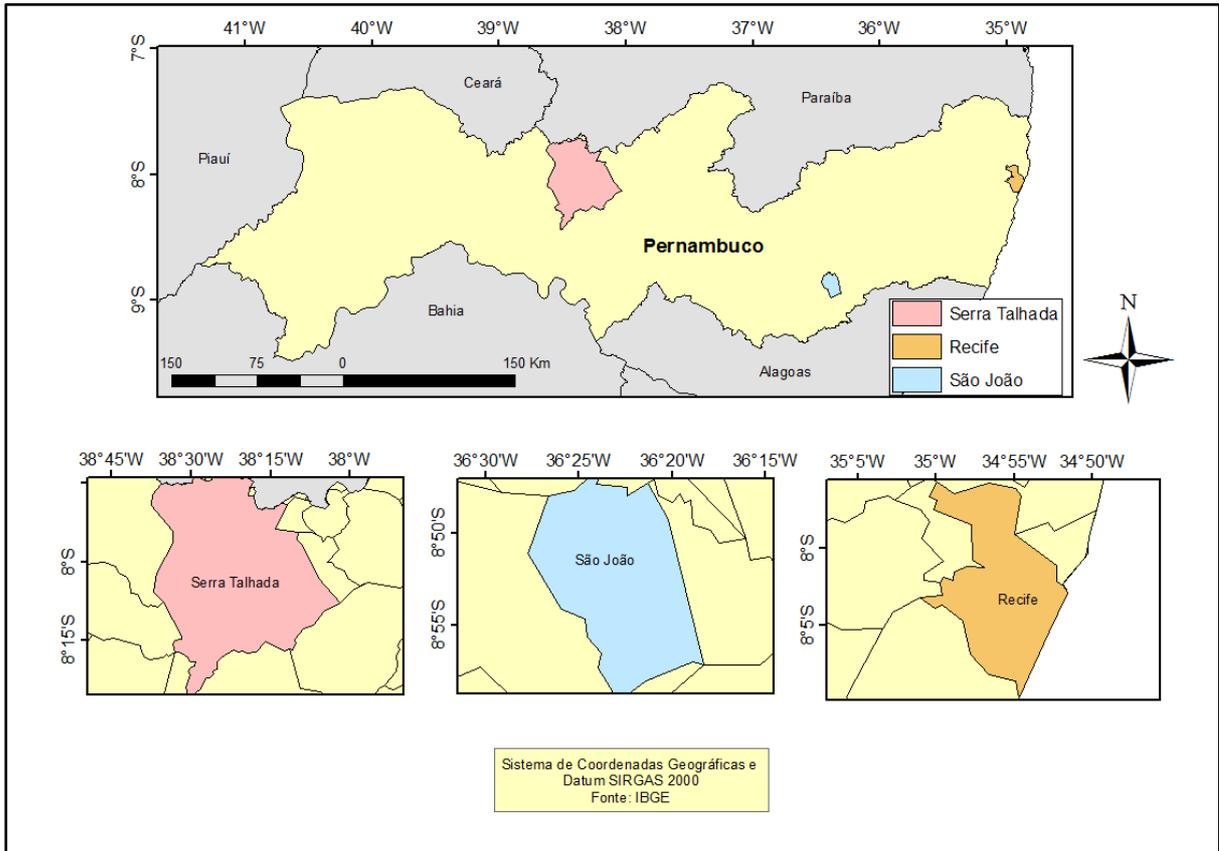
A segunda coleta foi conduzida em solo classificado como Luvisolo Crômico (SANTOS et al., 2013), localizado na Fazenda Lagoinha do município de Serra Talhada-PE,

este município que faz parte da microrregião do Vale do Pajeú (Figura 3) com coordenadas geográficas 07° 56'50,4" de latitude sul e 38° 23'29,0" de longitude oeste e altitude 429 m. O clima predominante na região é o clima do tipo BShw' que equivale a um clima semiárido conforme classificação de Köppen, caracterizando-se por ser quente e seco, com as chuvas de verão ocorrendo entre os meses de dezembro a maio, sendo os maiores volumes de chuva em março de cada ano e a precipitação média anual é de aproximadamente 642 mm (SOUZA, 2014).

4.2.3 Departamento de Energia Nuclear

A terceira coleta foi conduzida em solos de aterro tendo por características predominantes apresentar alto teor de Silte, no Departamento de Energia Nuclear – DEN, no campus da Universidade Federal de Pernambuco, no município de Recife-PE, o qual fica situado na microrregião do Recife (Figura 3) com coordenadas geográficas 8° 03' 67" de latitude sul e 34° 58' 12" de longitude oeste e altitude média de 4 m. Apresenta clima tropical As (GOLFARI et al., 1978) caracterizado pela ausência de chuvas de verão e sua ocorrência no inverno, com índices pluviométricos por volta de 1600 mm anuais, além da alta umidade relativa do ar e temperatura média anual em torno de 25°C.

Figura 3 - Ilustração do mapa do estado de Pernambuco, identificando as três regiões de coleta.



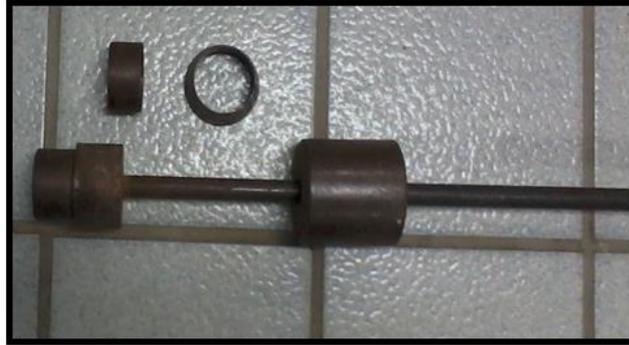
Fonte: O AUTOR(2015).

4.3 Determinação das propriedades físicas do solo

Para determinações da massa específica do solo (g.cm^{-3}), as amostras foram coletadas utilizando um amostrador cilíndrico, denominado de coletor de UHLAND (Figura 4). Cilindros de PVC de volume de $86,75 \text{ cm}^3$ foram acoplados ao amostrador, padronizando o volume das amostras. As coletas foram realizadas em todos os pontos e em suas respectivas profundidades. Para a determinação das massas específicas (g.cm^{-3}) dos solos coletados, as amostras foram colocadas em estufa a $105 \text{ }^\circ\text{C}$, por 24 horas, em seguida foram pesadas até massa constante. Através da Equação 1 que relaciona a massa do solo seco e o volume do cilindro ($86,75 \text{ cm}^3$), calculou se a massa específica (g.cm^{-3}) do solo.

A análise granulométrica dos solos coletados, foi realizada pelo método do densímetro, este que apresenta como princípio uma combinação de sedimentação e peneiramento do material analisado.

Figura 4 - Coletor de UHLAND utilizado para coletas de amostras indeformadas do solo.



Fonte: O AUTOR(2015).

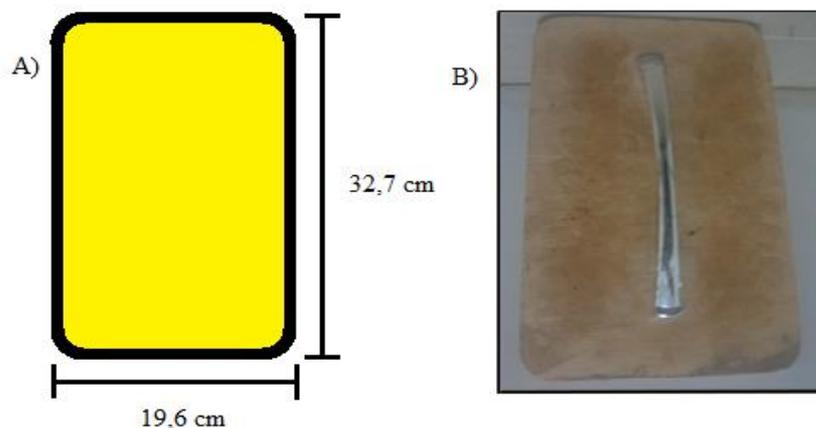
4.4 Preparação e Acondicionamento do Solo

Após coletado, o solo foi preparado visando a realização do experimento. Após a secagem ao ar e destorroadado, o solo foi peneirado em uma malha de 2 mm. O solo foi submetido a secagem em uma estufa de aquecimento durante o intervalo de tempo de 48 horas a uma temperatura de 105 °C. Com o propósito de uniformizar os experimentos e facilitar o manuseio do solo no preenchimento do recipiente.

Uma ferramenta foi confeccionada (Figura 5) para o preenchimento do recipiente com solo. Em tentativas preliminares, observou se, que o preenchimento do recipiente sem o auxílio de uma ferramenta apropriada não era recomendado. Devido ao solo ao final do processo, se apresentar com faixas irregulares, demonstrando desuniformidade na compactação, ao longo do recipiente.

Figura 5 - A) Ilustração demonstrando as dimensões e formato da ferramenta de compactação.

B) Ferramenta de madeira confeccionada.



Fonte: O AUTOR(2015).

A ferramenta confeccionada, é uma peça de madeira plana, semelhante a área útil do recipiente, utilizada com o objetivo de acomodar o solo de maneira mais uniforme. Esta apresenta dimensões ligeiramente menores que a largura e comprimento do recipiente, também apresenta as quinas curvas, permitindo o encaixe no recipiente (Figura 5). A ferramenta foi inserida no recipiente através da região superior, da forma mais horizontal possível, compactando o solo em direção ao fundo do recipiente.

Foi realizada uma comparação preliminar entre os três tipos de solos para o preenchimento do recipiente. E foi constatado, que a acomodação do solo no recipiente, pode variar de acordo com o tipo de solo. Para cada solo foi necessário aplicar diferentes níveis de esforço na ferramenta. Para simular maiores valores de massa específica no solo de textura grossa, menor esforço na ferramenta de compactação é aplicado, se comparado aos solos de textura média e fina.

Na acomodação do solo de textura grossa, não houve a necessidade de compactação para atingir o valor da massa específica preestabelecida. Para este tipo de solo foi necessário apenas a uniformização da massa do solo no recipiente. Para simular o mesmo valor de massa específica com solos de textura média e fina, houve a necessidade de fracionar a compactação, dividindo a massa em camadas.

Para a realização do experimento, foram utilizados recipientes plásticos da Container modelo OR-02 (Figura 6). O objetivo de utilizar esse tipo de recipiente é acomodar o solo, acoplar o sensor de umidade e o sistema de irrigação. Estes recipientes apresentam como vantagem, apresentar as paredes laterais transparentes, facilitando a visualização do avanço da frente de molhamento. Outra vantagem é apresentar tampa, minimizando as perdas de umidade por evaporação, e minimizar a influência do ambiente externo no decorrer do experimento. As caixas apresentam as seguinte dimensões: 33 cm de comprimento, 19,9 cm de largura e 25,6 cm de altura, além de apresentar as quinas curvadas, aberturas na região superior das laterais, com o intuito de servir como alças de apoio para transporte.

4.4.1 Determinação do volume útil do recipiente

Devido as quinas curvas, o recipiente plástico apresenta forma irregular. Por isto através de pesagens com água destilada, foi determinado o volume útil do recipiente. O recipiente foi posicionado em uma balança eletrônica, com capacidade máxima de 30000 g e sensibilidade de 5 g. A massa do recipiente foi tarada, e com água destilada ($\rho_{\text{água}} = 1 \text{ g.cm}^{-3}$), preenchemos o recipiente até a altura requerida.

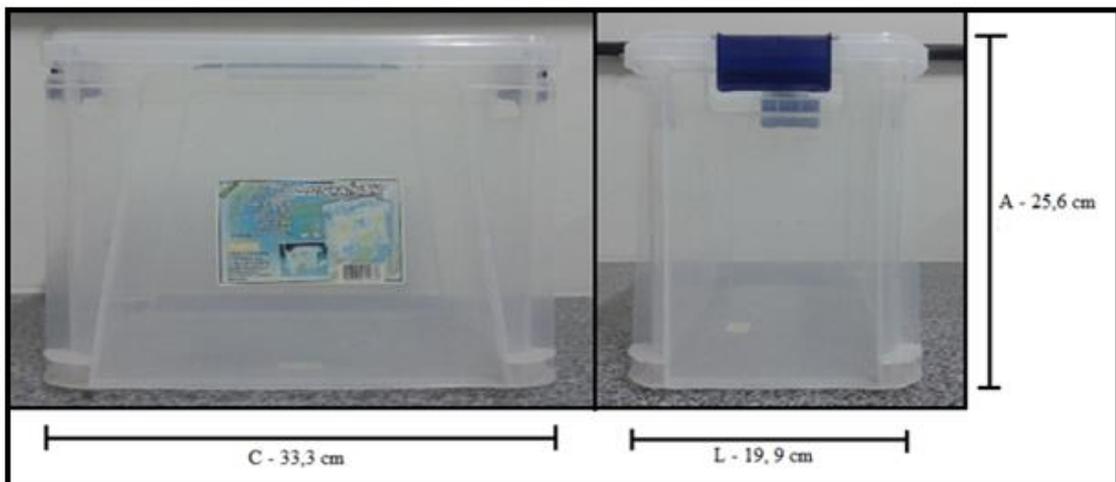
Inicialmente, o preenchimento com água destilada ocorreu até a altura de 18 cm e o valor da massa da água até esta altura, verificado na balança, resultou em 11700 g e conseqüentemente um volume de 11700 cm³. Em um segundo momento, o preenchimento foi realizado até a altura de 6 cm do recipiente, o valor da massa resultou em 3900 g e conseqüentemente em 3900 cm³ de volume.

Figura 6 - Recipientes plásticos.



Fonte: O AUTOR(2015).

Figura 7 - Dimensões dos recipientes.



Fonte: O AUTOR(2015).

4.4.2 Adaptação da caixa para inserção das hastas do sensor

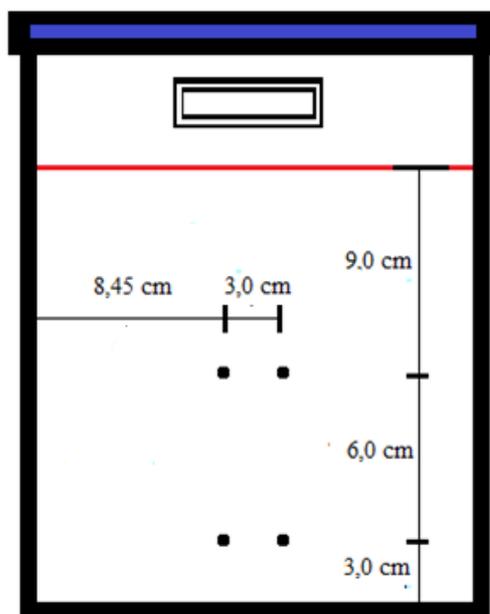
Condicinando o recipiente para a realização dos experimentos simulando irrigação, o recipiente foi adaptado visando a inserção do sensor de umidade. Com dois furos em uma face lateral da caixa. Para os experimentos com maior volume de solo (18 cm de espessura de solo),

os furos para inserção do guia de ondas foram realizados a uma altura de 9 cm, no ponto médio da altura e centralizado na largura do recipiente.

Para a condução do experimento com o menor volume de solo (espessura de 6 cm de solo), as adaptações para inserção do guia de ondas, foram localizadas a uma altura de 3 cm no ponto médio da espessura do solo. Para os experimentos com 6 cm de espessura de solo, não variando quanto a largura do experimento com maior volume.

A largura é de 8,45 cm entre as laterais do recipiente e as hastes do sensor (Figura 8). As adaptações foram confeccionadas, com intuito do guia de ondas serem acoplados no ponto médio da largura e espessura do solo preenchido no recipiente.

Figura 8 - Esquema demonstrando o local e as dimensões dos furos confeccionados para inserção do sensor.



Fonte: O AUTOR(2015).

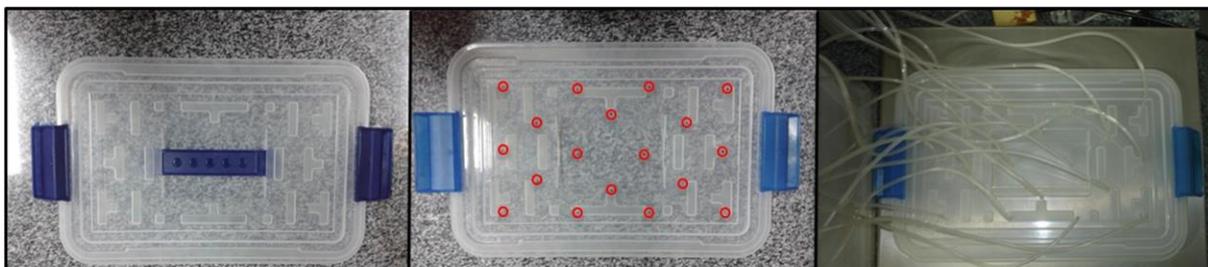
4.4.3 Adaptação da caixa quanto ao fornecimento de água

O recipiente também foi adaptado visando o fornecimento de água ao sistema, simulando uma irrigação através de gotejadores.

As modificações foram realizadas na tampa do recipiente com furos, formando 4 linhas com 3 gotejadores cada e 3 linhas com 2 gotejadores cada, resultando em uma malha de 18 furos distribuídos ao longo da tampa (Figura 9). Os furos foram confeccionados para acoplar os tubos de silicone que fazem o papel de gotejadores. Esta adaptação permite uniformizar o

umedecimento do solo ao longo do recipiente. E tornar o avanço da frente de molhamento um processo mais regular, afim de ser observado em uma face lateral do recipiente.

Figura 9 - Adaptações quanto ao fornecimento de água: Malha e Gotejadores.



Fonte: O AUTOR(2015).

4.4.4 Bomba peristáltica

O fornecimento de água para o experimento foi realizado com o uso de bombas peristálticas. As bombas são do modelo IPC de 12 canais da Ismatec (Figura 10). De acordo com a necessidade dos experimentos, pode-se variar o número de canais ou o número de bombas a ser utilizado. Nos experimentos que simulam irrigação, foram utilizadas duas bombas, 12 canais da primeira bomba e 6 canais da segunda totalizando, um fornecimento de água através de 18 canais. As bombas peristálticas apresentam um controlador digital, para escolha da vazão a ser utilizada, que é expressa em mililitros por minuto (ml/min).

A vazão informada à bomba, é a vazão equivalente de um único canal. Cada canal funciona através do acoplamento dos tubos de silicone de aproximadamente 2 mm na bomba, o acoplamento ocorre através de presilhas específicas denominada cassetes. Os tubos de silicone segundo o fabricante são específicos para o uso da bomba. Se faz necessário informar nas configurações da bomba, o diâmetro do tubo que irá ser utilizado, para posteriormente informar a vazão desejada.

Figura 10 - Bombas Peristálticas utilizadas para o fornecimento de água ao experimento.



Fonte: O AUTOR(2015).

4.4.5 Balança eletrônica

Para a realização dos experimentos simulando irrigação, todo o sistema foi montado sobre uma balança de pesagem eletrônica, modelo 2098 da Toledo. Esta balança apresenta como princípio de funcionamento células de cargas. A balança apresenta como capacidade máxima 30000 g e sensibilidade de 5 g, sendo composta de um visor digital, uma base de aço carbono e pés reguláveis.

4.4.6 Sensor de umidade tipo TDR - CS616

O sensor de umidade consiste em duas hastes do aço inoxidável conectadas a um circuito eletrônico. A placa de circuito é encapsulada em epóxi e quatro cabos condutores blindados são conectados para alimentar, acionar a sonda e monitorar o pulso de saída. As hastes da sonda podem ser inseridas a partir da superfície ou a sonda pode ser enterrada em qualquer orientação para a superfície.

O sensor de umidade que foi utilizado neste trabalho é do tipo CS616 da Campbell sci. Figura (11), projetado para medir a umidade volumétrica dos solos ou de outros meios porosos. A informação da umidade volumétrica é derivada a partir da constante dielétrica, que varia com a umidade do meio circundando as hastes. A resposta do CS616 é um sinal elétrico e este sensor foi conectado a uma central de aquisição de dados, modelo CR10X.

Especificações dos sensores

a) Dimensões

Haste: 300 milímetros de comprimento, diâmetro de 3,2 milímetros, afastamento de 32 milímetros

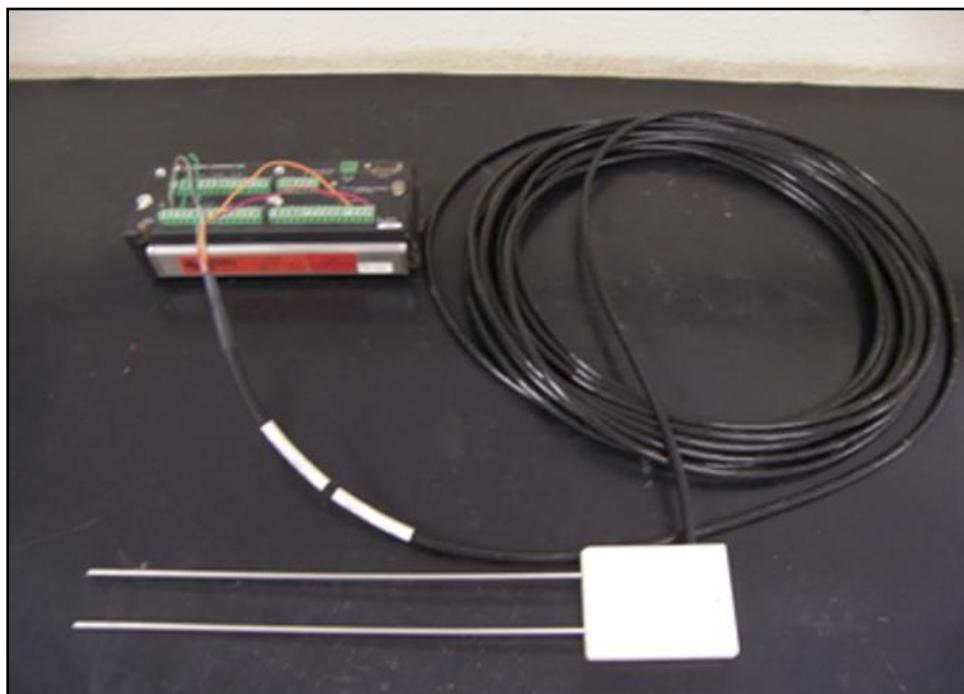
Cabeça da ponta de prova: 85 milímetros x 63 milímetros x 18 milímetros

b) Pesos

Ponta de prova (sem cabo): 280 g

Cabo: 35 g.m⁻¹

Figura 11 - Sensor de Umidade CS616 e Central de Aquisição de Dados CR10X.



Fonte: O AUTOR(2015).

O manual do equipamento traz informações de que o processo de medição da constante dielétrica do meio poroso é baseado na frequência de oscilação de um circuito multivibrador biestável que gera uma onda quadrada (CAMPBELL SCI., 2011). Assim, o resultado da medição consiste na realidade escalonar os curtos tempos de propagação em períodos cujos valores variam entre 14,9 e 43,6 μ s. Esses tempos podem ser correlacionados com umidade volumétrica (θ_v) através de uma equação quadrática (Equação 11) extraída do próprio manual do equipamento. Neste estudo o período de saída foi denominado de tempo de resposta (t) do sensor. E a relação entre o tempo de resposta (t) e a umidade volumétrica (θ_v), é descrito por uma equação quadrática (CAMPBELL SCI., 2011).

$$\theta_v = C_0 - C_1 \cdot t + C_2 \cdot t^2 \quad (11)$$

Na qual o θ_v é a umidade volumétrica expressa em $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$, t é o tempo em microssegundos (μs) e C_0 , C_1 e C_2 são os coeficientes da equação demonstrados na Tabela 1.

Tabela 1 - Coeficientes da Equação Quadrática.

C0	C1	C2
- 0,0663	- 0,0063	0,0007

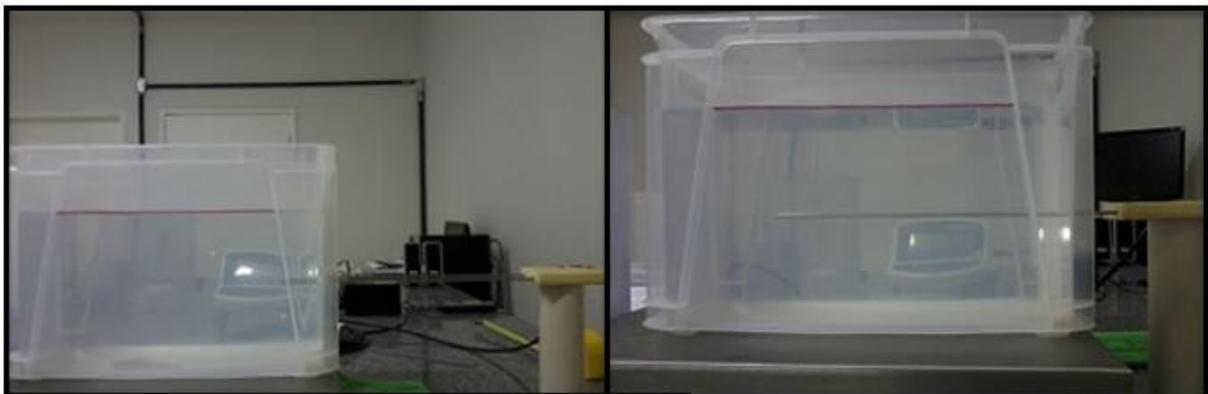
Fonte: CAMPBELL SCI. (2014).

4.4.7 Medidas no Ar e na Água

Foram realizadas medidas com o sensor CS616 no ar e na água. Estas medidas ocorreram visando determinar o envelope dos valores do tempo de resposta: quando exposto ao ar livre e em condição de saturação (Figura 12).

Para a realização destes experimentos foram necessárias a utilização de: água destilada, um sensor de umidade tipo TDR modelo CS616 e uma central de aquisição de dados CR10X, da Campbell sci., cola de silicone para vedação, régua milimétrica e um recipiente plástico similar ao utilizado nos experimentos com solo (Figura 6).

Figura 12 - Experimentos Ar x Água.



Fonte: O AUTOR(2015).

4.4.7.1 Experimento: Tempo de resposta (t) para várias posições da interface água-ar.

O primeiro experimento foi conduzido com o intuito de observar a influência quanto ao uso do comprimento do guia de ondas, no tempo de resposta (t) do sensor CS616, imerso em água destilada e exposto ao ar livre.

O recipiente utilizado no experimento, foi adaptado conforme item 3.4.2 acoplado a 9 cm do fundo do recipiente. A altura de preenchimento com água de 18 cm, no qual corresponde a 11,700 cm³ de volume de água destilada.

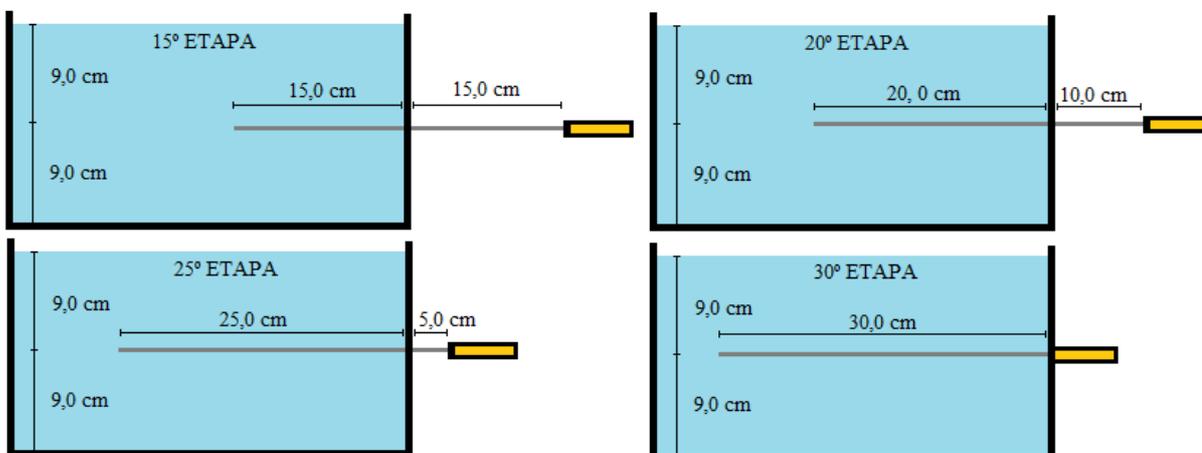
O guia de ondas do sensor apresenta 30 cm de comprimento, portanto o experimento foi dividido em 30 etapas, correspondente a análise da leitura do tempo de resposta a cada 1 cm em que as hastes foram inseridas no recipiente.

A etapa preliminar, consistiu em registrar o tempo de resposta do sensor ao ar livre, que corresponde aos 30 cm do comprimento do guia de ondas exposto ao ar, fora do recipiente. As 30 etapas seguintes do experimento foram conduzidas com a inserção do guia de ondas no recipiente. Em cada inserção ou etapa, foi necessário secar o recipiente, inserir o guia de ondas na posição correta, vedar e novamente preencher com água destilada até a altura requerida (18 cm), para assim realizar a leitura do tempo de resposta (t) do sensor.

As inserções do guia de ondas foram conduzidas de forma que 1 centímetro do comprimento do guia de ondas foi inserido por vez. Cada inserção correspondeu a uma etapa do experimento. Na última etapa do experimento, o sensor de umidade se encontravam com o seu comprimento máximo (30cm) inserido no recipiente, totalizando em 30 leituras tomadas mais a leitura do sensor ao ar livre.

Através do experimento é possível analisar o tempo de resposta (t) do sensor em função do comprimento das hastes do guia de ondas.

Figura 13 - Esquema demonstrando diferentes inserções do comprimento das haste, resultando em diferente interfaces água-ar.



Fonte: O AUTOR(2015).

4.4.7.2 Experimento: Tempo de resposta do sensor (t) em função da lâmina de água em que as hastes estão submetidas

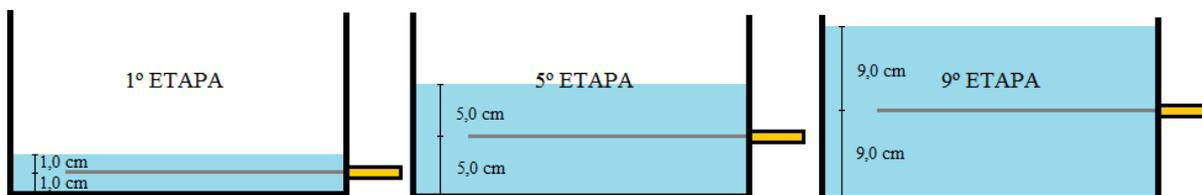
Este experimento foi realizado com o intuito de demonstrar o comportamento do tempo de resposta (t) do sensor em função da lâmina de água aplicada ao guia de ondas. Para a realização deste experimento o recipiente plástico foi adaptado conforme 3.4.2, as adaptações foram realizadas de acordo com lâmina de água a ser utilizada.

A montagem do experimento contou com, sensor de umidade CS616, uma central de aquisição de dados CR10X da Campbell sci., bateria 12 V, cola de silicone para vedação e um recipiente plástico (Figura 6).

O experimento foi dividido em 9 etapas. Cada etapa do experimento consistiu em inserir o guia de ondas no ponto médio de diferentes lâminas de água, dentro do recipiente plástico. Os pontos de inserção foram fixados em 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 e 9 cm de altura a partir do fundo do recipiente. Em cada ponto de inserção, o guia de ondas foi submetido a lâminas de água de 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16 e 18 cm respectivamente. Em cada etapa ou inserção, após a vedação do guia de ondas no recipiente, foi registrado o tempo de resposta (t) do sensor com o guia de ondas imersos em água e no recipiente vazio exposto ao ar livre.

Este experimento nos possibilitou analisar em centímetros, o alcance do sensor de umidade, ou seja, em que instante o sensor de umidade passa a enxergar apenas água, e em qual instante ele ainda enxerga o ar.

Figura 14 - Esquema demonstrando algumas etapas do experimento, com diferentes lâminas de água e inserções do sensor.



Fonte: O AUTOR(2015).

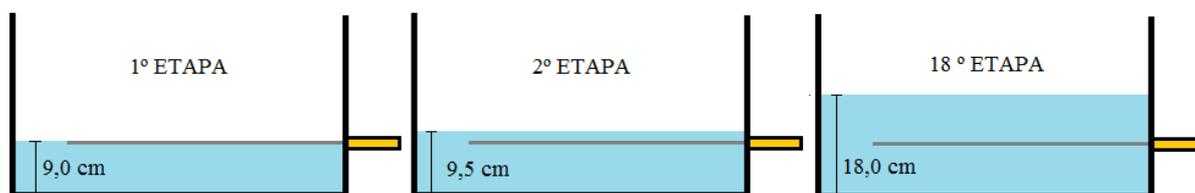
4.4.7.3 Tempo de resposta (t) em função de diferentes níveis de água em que as hastes estão submetidas

Este experimento foi conduzido com o intuito, de demonstrar o comportamento dos tempos de resposta (t) do sensor, em função da aplicação de diferentes níveis de água. Para a execução do experimento foi necessário utilizar um sensor de umidade CS616 e uma central de aquisição de dados da campbell sci., um recipiente plástico já apresentado neste estudo, água destilada e cola de silicone para vedação.

A montagem do experimento consiste na adaptação do recipiente plástico conforme 4.4.2, situado na altura de 9 cm, onde o guia de ondas será inserido no recipiente. O guia de ondas foi acoplado no recipiente com ajuda da cola de silicone, vedando o sensor no recipiente plástico. O sensor TDR foi conectado a uma central de aquisição de dados e uma bateria 12 V, possibilitando o registro dos tempos de repostas. A primeira etapa do experimento consiste em preencher com água destilada o recipiente, até alcançar a altura em que o guia de ondas está inserido (9 cm), a partir desta altura onde foi registrado o tempo de resposta (t), o experimento propõe que o nível de água seja elevado gradualmente 0,5 cm por vez, e o respectivo tempo de resposta (t) seja registrado, até alcançar a altura de 18 cm, totalizando em 18 leituras.

Este experimento também nos possibilitou analisar em cm, o alcance do sensor de umidade, com maior número de pontos, detalhando em que instantes a região de atuação do mesmo passa a enxergar apenas água e o ar livre.

Figura 15 - Esquema demonstrando diferentes etapas do experimento variando os níveis de água.



Fonte: O AUTOR(2015).

4.4.8 Experimento simulando irrigação com os três solos coletados.

Estes experimentos foram configurados, com o objetivo de simular um processo de irrigação, através de gotejadores, utilizando os solos coletados nos municípios de São João - PE, Serra Talhada - PE e Recife - PE.

O experimento consistiu em utilizar um recipiente plástico adaptado, preenchido com estes solos. Fornecer uma quantidade de água necessária para elevar a umidade destes solos secos em estufa, até atingir a saturação, em ambiente controlado. E assim observar o comportamento dos tempo de respostas (t) do sensor de umidade CS616 acoplado no sistema experimental, durante o processo de saturação.

As adaptações realizadas no recipiente plástico conforme 4.4.2 possibilitaram a inserção do guia de ondas no recipiente e as adaptações conforme 4.4.3 possibilitaram o acoplamento dos gotejadores que vão fornecer água ao experimento, como já demonstrados.

4.4.8.1 Preenchimento do recipiente com os solos coletados.

Inicialmente foi realizado uma bateria com três experimentos, onde cada experimento foi configurado com um dos tipos de solo, dentre os três coletados. Foi fixada a espessura de preenchimento do recipiente com solo, em todos os experimento em 18 cm. E a massa específica do solo (ρ_s), simulada dentro do recipiente de $1,55 \text{ g/cm}^3$.

Posteriormente foi realizada uma segunda bateria com três experimentos, utilizando os três solos. Para a execução destes experimentos, os valores fixados de espessura e massa específica de solo (ρ_s) foram de 6 cm e $1,56 \text{ g/cm}^3$ respectivamente, representando um terço do valor da espessura da primeira bateria com valores de massas específicas muito próximas, nessa bateria o guia de ondas foi inserido a 3 cm de altura.

4.4.9 Montagem Experimental do experimento simulando irrigação com solos

A primeira etapa do experimento foi a realização do cálculo da massa (g) de solo a ser acomodada no recipiente. Este foi calculado através do volume do recipiente de 11700 cm³ e 3900 cm³, que corresponde à espessura de 18 cm e 6 cm, respectivamente. O cálculo da massa (g) de solo leva em consideração também a massa específica do solo (ρ_s) que se deseja obter para a montagem de cada experimento, através da Equação 1, a massa específica do solo utilizada para a execução dos experimentos foi 1,55 g/cm³ na primeira bateria e 1,56 g/cm³ na segunda.

Com a massa (g) de solo calculada e a tara do recipiente registrada, se inicia a montagem do experimento. Inicialmente realiza-se o preenchimento do solo no recipiente. Esse processo pode variar de acordo com o tipo de solo e foi conduzido com o auxílio da ferramenta já descrita em 4.4. Para solos de textura grossa, ensaios prévios demonstram que menor esforço é exigido para a compactação, até atingir a massa específica desejada. Para solos de textura fina, maior esforço de compactação é necessário para preencher o solo no recipiente até a espessura requerida.

Com o recipiente já preenchido com solo, o mesmo foi posicionado sob a balança eletrônica, onde foi verificado a massa (g) do sistema RECIPIENTE + SOLO. A seguir foram posicionadas as bombas peristálticas e o reservatório de água ao lado da balança.

Para fornecer água ao experimento, um reservatório com capacidade de cerca de 15 litros foi utilizado com água destilada. A bomba peristáltica foi configurada com a vazão e diâmetro do tubo específicos necessários para cada experimento. Os 18 tubos de silicone através dos suportes foram acoplados na bomba peristáltica e as extremidades de sucção dos tubos foram justapostas lado a lado com o auxílio de presilhas, e imergidas no reservatório com água destilada. As outras extremidades dos tubos foram acopladas nos 18 furos confeccionados na tampa do recipiente como já demonstrados em 4.4.3.

Com os equipamentos posicionados, o guia de ondas foi inserido no recipiente já com o solo. O sensor CS616 foi conectado à central de aquisição de dados (datalogger) do tipo CR10X. A central nos permitiu monitorar e coletar o tempo de trânsito (t) dos pulsos elétricos no guia de ondas em microssegundos (μ s). A central de aquisição de dados, foi programada para medir o tempo de trânsito do pulso a cada segundo, porém na coleta dos dados os valores são expressos por minuto através da média dos valores medidos por segundo. Neste trabalho denominamos o tempo de trânsito do sensor de tempo de resposta (t). O fornecimento de energia para o funcionamento do sensor foi realizado através de uma bateria de 12 V.

Para a inserção do guia de ondas, foram tomadas precauções recomendadas pelo manual do sensor. A inserção foi conduzida da forma que o guia de ondas permaneçam o mais paralela possível, mantendo o desenho da geometria do guia de ondas (3 cm entre as duas hastes). A inserção deve ocorrer de maneira que não haja perturbação entre o solo circundante e as hastes, para que não se formem bolhas de ar, afetando as medidas. E outra precaução é que as hastes não penetrem no solo de forma diagonal. A cabeça da ponta de prova do sensor foi vedada junto ao recipiente com cola de silicone.

Em seguida a tampa da caixa adaptada com os gotejadores foi acoplada. Duas régua milimétricas foram fixada com fita adesiva transparente na lateral do recipiente. A montagem dos experimentos podem ser visualizadas nas Figuras 16, 17 e 18.

Após a montagem do experimento, a porosidade do solo e conseqüentemente a massa (g) de água necessária para saturar o solo foi calculada, através da Equação 12. O início do experimento se deu com o acionamento da bomba peristáltica e conseqüentemente da irrigação do solo com água destilada. A massa do sistema montado é a massa inicial a ser considerada com o solo seco, porém no tratamento do dados foram subtraídas as massas dos equipamentos e só considerando a massa do solo dentro do recipiente.

$$P(\%) = \left(1 - \frac{\rho_s}{\rho_p}\right) \cdot 100 \quad (12)$$

Na qual, $P(\%)$ é a porosidade do solo expressa em %, ρ_s é a massa específica do solo e ρ_p é a densidade da partícula ($2,65 \text{ g.cm}^{-3}$) todas expressas em g.cm^{-3} .

O experimento consistiu em tomar nota da massa do sistema montado a partir do início da irrigação e por minuto registrar a variação de massa de água observada na balança. Através da subtração da massa computada dos equipamentos que compõe o sistema, obtemos a massa de solo inicial. Com a massa do solo inicial foi possível, calcular a umidade gravimétrica por minuto através da Equação 2. Esta que posteriormente foi transformada em umidade volumétrica medida através da Equação 4. Este processo foi repetido até a quantidade de água necessária para saturar o solo, for inserida ao sistema.

A umidade volumétrica medida será confrontada com a estimada pela equação quadrática, até o solo atingir a saturação. O avanço da frente de molhamento foi registrado por minuto, através de uma régua milimétrica, até alcançar o fundo do recipiente.

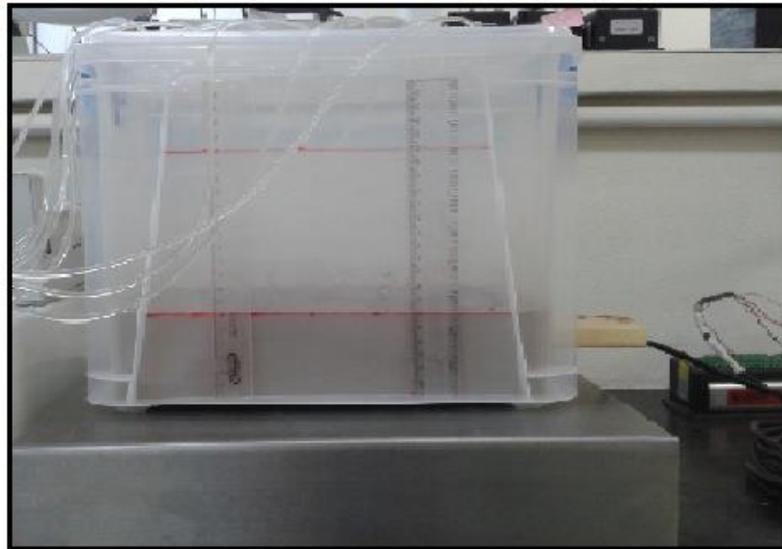
A montagem experimental foi a mesma, em cada experimento utilizando os três tipos de solos coletados e a mesma para os experimentos com maior (Figura 16) e menor (Figura 17) volume de solo.

Figura 16 - Montagem experimental com 18 cm de espessura de solo no recipiente.



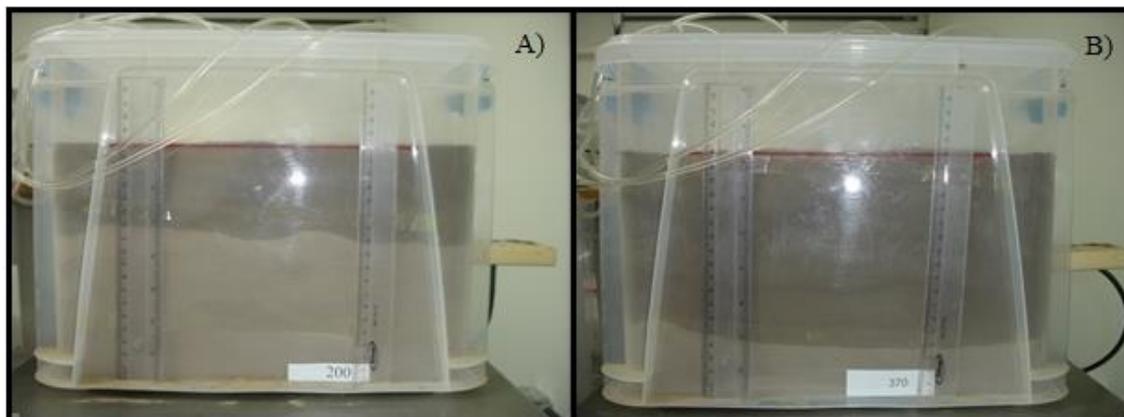
Fonte: O AUTOR(2015)

Figura 17 - Montagem experimental com 6 cm de espessura de solo no recipiente.



Fonte: O AUTOR(2015).

Figura 18 - Diferentes etapas experimentais: A) Experimento com 200 minutos de irrigação; B) Experimento com 370 minutos de irrigação.



Fonte: O AUTOR(2015).

4.5 Desempenho do modelo quadrático

Quatro critérios estatísticos foram utilizados para a análise dos dados calculados através da equação quadrática, o erro quadrático médio, EQM; a razão de desvios, RD; a eficiência da modelagem, EM; coeficiente de massa residual, CMR; coeficiente de determinação, R^2 e o coeficiente de correlação, R.

O valor do Erro Quadrático Médio (EQM) indica o grau de desvio entre as determinações experimentais e os valores calculados pelo modelo teórico correspondente, expresso como porcentagem da média das determinações experimentais e o valor esperado de EQM tende a zero, quando os valores estimados e os teóricos tendem a ser iguais.

A razão de desvio (RD) descreve a razão entre o espalhamento dos valores calculados pelo modelo teórico correspondente, o valor esperado tende a 1, quando os valores estimados e os obtidos do modelo teórico são consistentes. A Eficiência de modelagem (EM) indica se o modelo teórico fornece uma estimativa melhor das determinações experimentais que o valor médio dessas determinações, assim como o RD seu valor esperado tende a 1 (um).

O coeficiente de residual massa (CRM) tende a zero na ausência de desvios sistemáticos entre valores teóricos e experimentais, como também indica se o modelo tende a superestimar ou a subestimar, com valores de CRM negativos ou positivos, respectivamente.

O R^2 é o coeficiente de determinação, varia entre 0 e 1, indicando o quanto o modelo consegue explicar os valores medidos. A raiz quadrada de R^2 do coeficiente de determinação é o R, ou seja, o coeficiente de correlação é, que mede o grau de relacionamento entre as variáveis, quando este parâmetro tende a 1 é indicio de uma correlação positiva.

$$EQM = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (T_i - M_i)^2}{N} \right]^{\frac{1}{2}} \cdot \frac{100}{M} \quad (14)$$

$$RD = \frac{\sum_{i=1}^N (M_i - \bar{M})^2}{\sum_{i=1}^N (T_i - \bar{M})^2} \quad (15)$$

$$EM = \frac{\sum_{i=1}^N (M_i - \bar{M})^2 - \sum_{i=1}^N (T_i - M_i)^2}{\sum_{i=1}^N (M_i - \bar{M})^2} \quad (16)$$

$$CMR = \frac{\sum_{i=1}^N M_i - \sum_{i=1}^N T_i}{\sum_{i=1}^N M_i} \quad (17)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (T_i - M_i)^2}{\sum_{i=1}^N (M_i - \bar{M})^2} \quad (18)$$

$$R = \sqrt{R^2} \quad (19)$$

No qual T_i são os valores calculados pelo modelo, M_i os valores experimentais, \bar{M} a média dos valores experimentais e N o número de determinações.

4.6 Calibrações

Foram realizados experimentos, com o intuito de calibrar o sensor de umidade para os três tipos de solos estudados nesse trabalho. As calibrações foram conduzidas conforme a montagem experimental descrita no item 4.4.9, com 3900 cm³ de volume de solo, que corresponde a 6 cm de altura no preenchimento do recipiente com solo. Os solos utilizados para os experimentos, foram preparados e acomodados como descrito no item 4.4. Para a realização das calibrações, foram utilizadas os mesmos valores de massa de solo (6090 g) e massa específica do solo (ρ_s) 1,56 g.cm⁻³, para os três tipos de solo.

O experimento de calibração do sensor, consistiu em aplicar diferentes valores de umidade volumétrica (θ_v) ao solo, partindo do solo seco até alcançar a saturação. Através do sistema de irrigação já descrito nos experimentos anteriores. Diferentes valores de massa de água foram aplicadas ao solo, esses valores foram controlados através de uma balança eletrônica e correspondem a valores específicos de umidade volumétrica (θ_v).

O sensor de umidade utilizado nas calibrações foi o descrito no item 4.4.6 e inserido no recipiente conforme o item 4.4.2 para altura de 6 cm de solo. Durante a execução experimental a leitura do tempo de resposta do sensor (t) apenas foi computada, quando a massa de água aplicada por etapa, infiltra e redistribui no solo. Quando a água está totalmente redistribuída no solo, a leitura do tempo de resposta (t) não apresenta variações significativas, estabilizado para aquela umidade volumétrica aplicada.

Para a realização dos experimento, determinou se que seriam aplicadas dez valores diferentes de umidade volumétrica (θ_v), para cada umidade aplicada será realizada uma leitura no equipamento. Serão tomadas nove leituras correspondentes a aplicação de nove valores de umidade volumétrica (θ_v), mais a leitura com o solo seco, totalizando em 10 pontos de calibração.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Caracterização física dos solos coletados

Os valores das massas específicas dos solos coletado ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$), os teores de areia, silte e argila e a classificação textural, obtidos a partir da amostragem indeformada e da análise granulométrica respectivamente, são apresentados na tabela 2.

Tabela 2 - Massa específica, classificação textural e os teores de areia, silte e argila dos solos coletados em São João, Serra Talhada e DEN.

Solos	Profundidade (cm)	Textura	ρ_s ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	Teores (%)		
				Areia	Silte	Argila
São João	0 – 20	Areia Franca	1,56	82,7	13,8	3,5
Serra Talhada	40 – 60	Franco Argiloso	1,38	43,7	18,7	37,5
DEN	0 – 20	Franco	1,55	46,3	37,3	16,4

Fonte: O AUTOR(2015).

O solo coletado no município de São João – PE, na profundidade de 0 a 20 cm, foi caracterizado como tipo Areia Franca e apresenta massa específica, no ponto de coleta de $1,56 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$. O solo coletado no município de Serra Talhada, na profundidade de 40 a 60 cm, foi classificado como tipo Franco Argiloso, apresentando valor de massa específica no ponto de coleta de $1,38 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$. No ponto de coleta do DEN no município de Recife – PE, o solo coletado foi classificado como tipo Franco na profundidade de 0 a 20 cm e $1,55 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ de valor de massa específica no ponto da coleta.

No solo tipo Areia franca, observar-se baixos teores de silte e argila, e altos teores de areia chegando a mais de 80 % da sua composição textural, esse é um tipo de solo bastante arenoso. No solo tipo Franco, observa-se que os teores de silte e areia em sua composição granulométrica são mais equilibrados, e o teor de argila mais baixo que os demais. Porém, o teor de argila do solo tipo Franco é cerca de 5 vezes maior, que o teor desse mineral, no solo tipo Areia Franca. O solo tipo Franco argiloso, apresenta os maiores teores de argila e o menor teor de areia, dentre os três tipos trabalhados.

Este tipo de análise comprova que a montagem experimental proposta por este estudo, foi realizada com três tipos físicos diferentes de solos, possibilitando analisar se diferentes

teores de areia, silte e argila pode apresentar diferentes comportamentos de resposta do sensor. Além de, observar o desempenho da equação quadrática embutida no manual do equipamento para os três tipos de solos.

Analisando os valores das massas específicas no local de coleta dos solos, foi possível estabelecer os valores da massa específica que foram simuladas dentro do recipiente. Os valores de 1,55 e 1,56 g.cm⁻³ são valores acessíveis para simular em todos os tipos de solos.

5.2 Medidas no Ar e na Água

Os experimentos descritos a seguir realizaram medidas com o sensor de umidade CS616 tipo TDR, exposto ao ar e em água destilada. Os experimentos foram realizados no Laboratório de Física do Solo do Departamento de Energia Nuclear na Universidade Federal de Pernambuco.

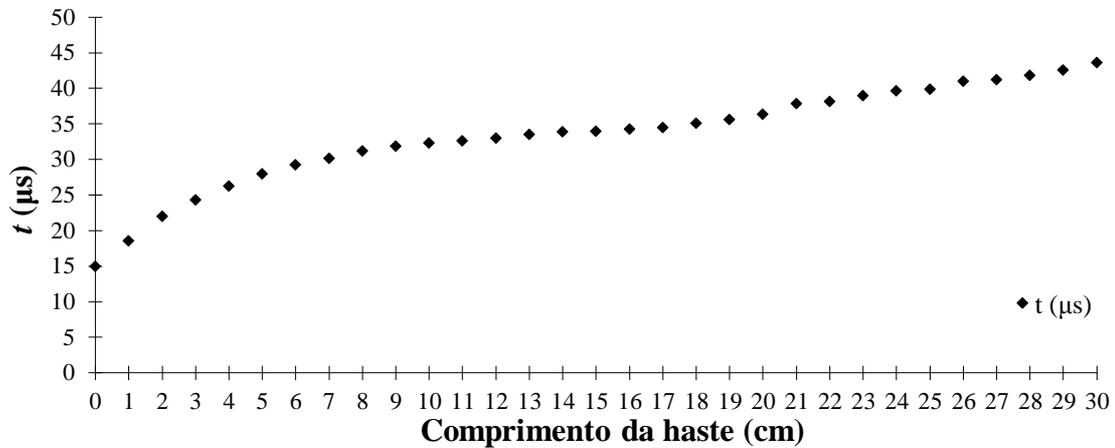
5.2.1 Experimento 1: Tempo de resposta (t) para várias posições da interface água-ar

Este experimento foi realizado com o intuito de demonstrar o comportamento do tempo da resposta (t) do sensor em μs , em função da posição da interface água-ar no sensor em um recipiente preenchido com 11700 cm³ de água destilada.

O experimento foi dividido em 30 etapas: a pré-etapa foi a medição do tempo de resposta (t) do sensor ao ar livre. As 30 etapas do experimento, foram conduzidas com a inserção do guia de ondas no recipiente, preenchido com água destilada.

O experimento foi conduzido de forma que 1 centímetro foi inserido por vez no recipiente, e cada inserção correspondeu a 1 etapa do experimento. Em cada etapa, foram tomadas as leituras do tempo de resposta (t) do sensor. Na última etapa do experimento, o sensor de umidade se encontrava com o seu comprimento máximo (30 cm) inserido no recipiente preenchido com água. O resultado deste experimento pode ser observado na Figura 19.

Figura 19 - Tempo de resposta do sensor (t) em função de diferentes posições da interface água-ar.



Fonte: O AUTOR(2015).

As leituras do tempo de resposta (t) do sensor de umidade, foram esperadas dentro de uma faixa fornecida pelo fabricante de 14,9 a 43,6 μs , correspondente aos guia de ondas exposto ao ar livre e imerso em água, respectivamente (CAMPBELL, 2011).

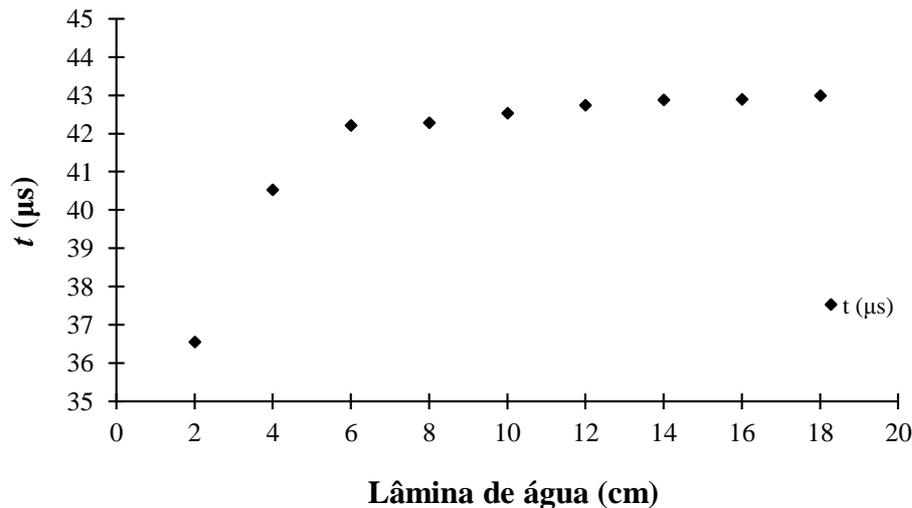
Na pré-etape do experimento, com o guia de ondas exposto ao ar livre, o sensor apresentou 14,94 μs como tempo de resposta. Com 1 cm do guia de ondas inserido no recipiente com água, o sensor apresentou tempo de resposta (t) de 18,57 μs , desmostrando a reação do sensor ao contato de 1 cm do comprimento do guia de ondas com a água. Esse tipo de comportamento é observado até a etapa final do experimento. Os acréscimos mais significativos ocorreram entre as inserções de 1 e 6 cm, onde o tempo de resposta para 6 cm foi de 29,28 μs . A partir deste ponto os incrementos são menores, como pode-se observar no gráfico, a derivada permanece praticamente constante. Quando o sensor se encontra totalmente inserido no recipiente com água tem-se uma leitura do tempo de resposta de 43,58 μs . Na prática o comportamento não linear do gráfico pode ser esperado principalmente pelo fato da constante dielétrica dos dois meios (água e ar) serem bastante diferentes uma da outra, pois é o valor efetivo que o sensor irá traduzir em resposta.

É importante destacar, que a realização desse experimento, demonstrou a sensibilidade do sensor quanto ao uso do seu comprimento. A região mais sensível do comprimento do guia de ondas, são os 6 primeiros centímetros. Da inserção de 7 a 30 cm, a sensibilidade se comporta praticamente constante, a medida que cada centímetro da haste foi inserido.

5.2.2 Experimento 2: Tempo de resposta (t) em função da lâmina de água em que as hastes estão submetidas

Este experimento demonstra o comportamento da leitura do tempo de resposta (t), em função da lâmina de água aplicada ao guia de ondas. O experimento foi dividido em 9 etapas, onde foram realizadas leituras do tempo de resposta do sensor. Em cada etapa do experimento as hastes foram inseridas no ponto médio de diferentes lâminas de água. Os pontos de inserção foram fixados em 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 e 9 cm de altura a partir do fundo do recipiente. Assim, as laminas foram de 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16 e 18 cm respectivamente. O resultado deste experimento pode ser observado na Figura 20.

Figura 20 - Tempo de resposta do sensor (t) em função da aplicação de diferentes lâminas de água.



Fonte: O AUTOR(2015).

O tempo de resposta do sensor, para uma situação de imersão total em água, de acordo com o fabricante é de aproximadamente 43,6 μs . Isto foi comprovado através do experimento descrito em 5.2.1, onde foram encontrados para esta situação uma leitura de 43,58 μs .

Os resultados demonstram que na primeira etapa do experimento, o sensor apresentou a leitura de 36,55 μs com o guia de ondas submetido a uma lâmina de 2 cm. Na etapa seguinte a leitura do tempo de resposta (t) correspondente a lâmina de 4 cm foi de 40,52 μs . Seguindo o mesmo raciocínio da primeira etapa do experimento, pôde-se constatar, que o sensor além de

“enxergar” a lâmina de água que se encontra 2 cm acima e abaixo do guia de ondas, o sensor também enxergou o ar livre acima e abaixo da lâmina de 4 cm.

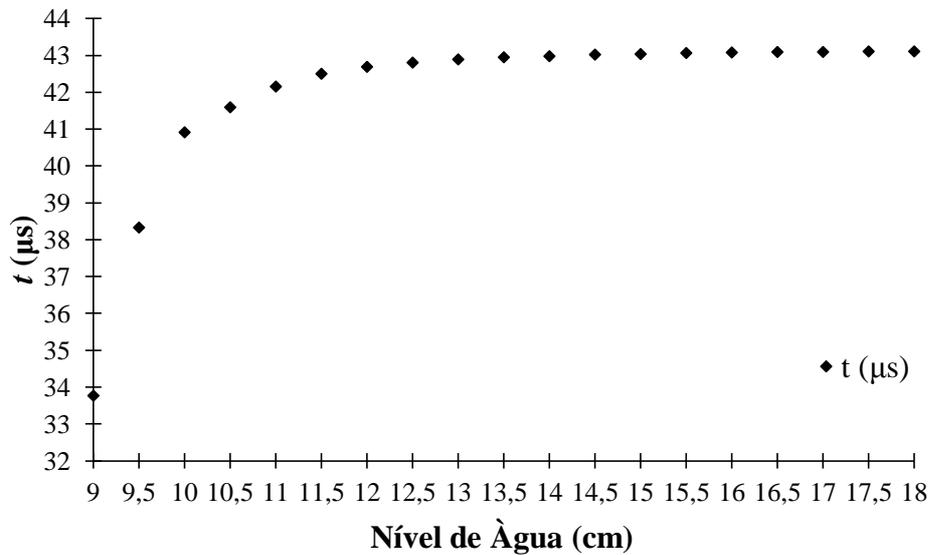
Na terceira etapa do experimento, o guia de ondas foi submetido a uma lâmina de 6 cm e a leitura do sensor foi de 42, 21 μ s. Nota-se que este valor, ainda enxerga o ar livre acima e abaixo da lâmina de água, porém, se aproxima significativamente do maior valor de leitura apresentado pelo sensor, nas etapas seguintes, de 42,99 μ s. Valores das leituras do tempo a partir da terceira etapa, que correspondem a lâmina de 6 cm até a nona etapa com uma lâmina de 18 cm, mostram que não houve acréscimo significativo, variando de etapa para etapa em média 0,1 μ s. Assim, pode-se afirmar que a partir da terceira etapa a região de alcance do sensor passa a “enxerga” apenas a lâmina de água.

Foi possível comprovar a existência da região de atuação do sensor, esta região corresponde ao alcance do sensor ou seja a que distância do guia de ondas o sensor está verificando a variação de umidade. O alcance por assim dizer, apresenta dimensões de aproximadamente 3 cm acima e abaixo do guia de ondas.

5.2.3 Experimento 3: Tempo de resposta (t) em função de diferentes níveis de água em que as hastes estão submetidas

Este experimento, foi realizado com o intuito de determinar o alcance do sensor, através da aplicação de diferentes níveis de água. A primeira etapa do experimento consiste em preencher com água destilada o recipiente, até alcançar a altura em que o guia de ondas está inserido (9 cm), a partir desta altura onde foi registrado o tempo de resposta (t), o experimento propõe que o nível de água seja elevado gradualmente 0,5 cm por vez e o respectivo tempo de resposta (t) seja registrado, até alcançar a altura de 18 cm, totalizando em 18 etapas. O resultado deste experimento, pode ser observado na Figura 21.

Figura 21 - Tempo de resposta (t) em função de diferentes níveis de água.



Fonte: O AUTOR(2015).

No primeiro ponto, o nível de água se encontra na mesma altura das hastes do sensor de umidade (9 cm), nesse ponto o sensor registrou 33,7 μs . Elevando o nível em 0,5 cm por vez, é possível observar que existe uma variação significativa nos valores do t do nível de 9 a 10 cm. E menores variações nos valores do t no nível de 10 a 12 cm, formando o degrau inicial observado no gráfico da Figura 21. A partir deste ponto (12 cm), até o nível máximo (18 cm), as variações são praticamente desprezíveis, ou seja, a derivada se comporta praticamente constante.

O experimento demonstra que a região de atuação do sensor é 3 cm acima e abaixo do guia de ondas, como já foi demonstrado no experimento 5.2.2. Além de determinar que as regiões mais sensíveis do alcance do sensor é em torno de 1 cm acima e abaixo do guia de ondas. As regiões mais próximas do sensor de umidade CS616, são as mais sensíveis (CAMPBELL, 2011).

5.3 Experimentos simulando irrigação para avaliar o efeito da dinâmica da água e dos atributos físicos do solo no tempo de resposta do sensor (t)

Esses experimentos foram realizados no Laboratório de Física dos Solos do Departamento de Energia Nuclear da UFPE, com o intuito de avaliar os efeitos que diferentes processos de dinâmica da água no solo, pode causar no tempo de resposta (t) do sensor de umidade. O experimento foi realizado com os três tipos de solos coletados. De acordo com a análise granulométrica, os solos utilizados nos experimentos são Areia Franca, Franco e Franco

argiloso. Cada tipo de solo utilizado nestes experimentos, apresentam diferentes características e atributos físicos particulares, como por exemplo sua classificação textural. Isto possibilitou, simular diferentes processos dinâmicos para infiltração da água no solo.

Através dos experimentos descritos no tópicos 5.2.2 e 5.2.3, onde foi determinado que o alcance do sensor é de aproximadamente 3 cm, nos permitiu avaliar se a depender do tipo de solo em que o sensor estiver medindo, ocorrerá alguma variação no alcance deste. Nos experimentos simulando irrigação, o recipiente plástico, foi preenchido com solo até a espessura de 18 cm e o guia de ondas foi inserido a 9 cm de altura em relação ao fundo do recipiente. Por isto o limite superior do alcance do sensor foi de 6 cm e o inferior 12 cm, em relação à espessura total (18 cm) de solo no recipiente.

O experimentos com os três tipos de solo, foram configurados com o preenchimento de 18.185 g de solo no recipiente. Com o intuito de reproduzir artificialmente uma massa específica do solo de $1,55 \text{ g.cm}^{-3}$ para os três casos. Considerando a densidade da partícula $2,65 \text{ g/cm}^3$, obteve-se porosidade de 41,35 %. Através da porosidade foi calculado, que a adição de 4.837,74 ml de água, seriam necessários para saturar o solo presente dentro do recipiente.

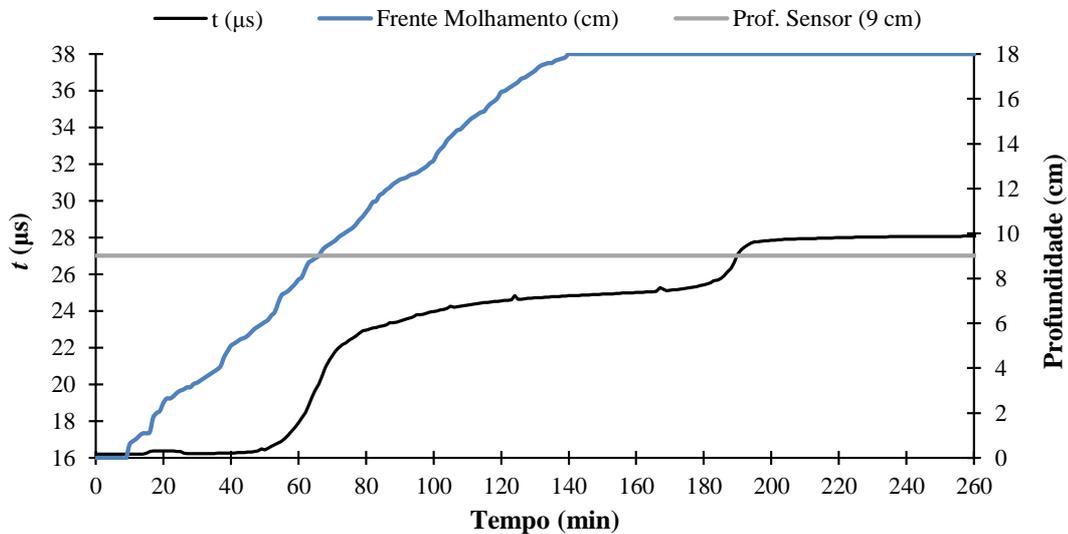
Como não foi possível o controle total do avanço da frente de molhamento ao longo do recipiente, foi realizada apenas o monitoramento pelas laterais da recipiente, permitindo uma referência aproximada do posicionamento do avanço da frente de molhamento, ao longo do experimento.

5.3.1 Experimento 4: Realizado com solo Franco Arenoso, com massa específica de $1,55 \text{ g.cm}^{-3}$ e volume de 11700 cm^3

O experimento foi realizado no dia 18 de julho do ano de 2014 e foi conduzido com solos tipo Areia Franca. experimento foi conduzido com o intuito de elevar a umidade do solo seco, até a saturação. A irrigação ocorreu através de uma bomba peristáltica, com vazão de 20 mililitros por minuto. Esta foi realizada através de 18 gotejadores, com a vazão unitária em cada gotejador de 1,1 mililitros por minutos. O tempo total de irrigação para saturar o solo, neste experimento foi de 04 horas 23 minutos e 8 segundos.

Nos resultados deste experimento, observa-se o comportamento do tempo de resposta (t) do sensor e do avanço da frente de molhamento, em função do tempo. A referência cinza representa a profundidade (9 cm) do sensor de umidade, em relação ao avanço da infiltração. Os resultados do experimento podem ser observados na Figura 22.

Figura 22 – Avanço da frente de molhamento (cm) e tempo de resposta do sensor (t), em função do tempo, no experimento com solo tipo Areia Franca.



Fonte: O AUTOR(2015).

No início do experimento, com o solo seco em estufa, o sensor registrava o t de $16,2 \mu\text{s}$. No decorrer de experimento, este valor se mantém com pequenas variações, posteriormente desprezadas. Variando apenas cerca de $0,2 \mu\text{s}$ em 50 minutos, passando de $16,2$ para $16,4 \mu\text{s}$. A partir de 50 minutos de experimento, o sensor começa a apresentar variações significativas do t do sensor. Analisando o avanço da frente de molhamento, observou-se que este é o instante (50 min) que a frente de molhamento avançou 6 cm da espessura de solo, alcançando o limite superior do alcance do sensor já determinado. Portanto 50 minutos é o instante em que o sensor passar a “enxergar” o acréscimo da umidade no solo, devido a infiltração da água no solo.

Analisando a Figura 22, verificou-se que com 47 minutos, o tempo de resposta começou a apresentar variações significantes do t . Nesse instante, o avanço da frente de molhamento era de 5,75 cm. Esta diferença de 0,25 cm entre a análise da frente de molhamento e a análise da variação do tempo de resposta, pode se justificar pela infiltração que é um processo irregular. Esta constatação nos permitiu adotar como referência a medição do avanço da frente de molhamento, para analisar as próximas etapas do experimento.

Após a infiltração alcançar a região de atuação, o tempo de resposta (t) do sensor ($16,44 \mu\text{s}$) aumentou significativamente em um curto intervalo de tempo, dando início ao primeiro degrau observado no gráfico da Figura 22. A infiltração da água no solo, percorre mais 3 cm com 66 minutos de experimento, alcançando as hastes do sensor (9 cm). Neste instante t era de $20,04 \mu\text{s}$. A leitura variou $3,6 \mu\text{s}$ em 16 minutos, nesse instante região que corresponde ao

alcance do sensor se encontra com a regoão superior (3 cm) umedecida e a região inferior (3 cm) seca. Com 87 minutos de experimento, a infiltração avançou mais 3 cm, atingindo o limite da inferior do alcance do sensor (12 cm). Nessa etapa, não existe mais solo seco dentro do alcance do sensor. No gráfico da Figura 16 observar-se este fenômeno com a região final do primeiro degrau, neste instante o t era de 23,7 μ s, a variação foi de 3,6 μ s em 21 minutos.

O degrau inicial representa a passagem da frente de molhamento através do alcance do sensor. Esse degrau é reflexo do acréscimo do t de 7,2 μ s em um curto intervalo de tempo de 37 minutos.

Com 140 minutos de experimento, o t era de 24,83 μ s, nesse instante a frente de molhamento atinge o fundo do recipiente (18 cm). A variação do tempos de resposta (t) entre as etapas foi de apenas 1,46 μ s em 53 minutos.

Após a frente de molhamento atingir o fundo do recipiente, foi observado a formação da frente de saturação, isto se dá com o início de acúmulo de água a partir do fundo do recipiente, saturando o solo em direção a superfície. Este fenômeno se reflete no segundo degrau observado no gráfico. Quando a frente de saturação atravessa a região correspondente ao alcance do sensor, observa-se novamente, uma variação significativa nos t , em curto intervalo de tempo. Variando 2,75 μ s em 32 minutos, o t ao final do experimento com o solo saturado foi de 28,08 μ s.

Observou-se também que a passagem da infiltração pelo alcance do sensor, limite superior (6 cm) até o guia de ondas (9 cm) ocorreu uma variação de cerca de 3,6 μ s, e entre passagem da pelo guia de ondas (9 cm) até o limite inferior (12 cm) a variação também foi de 3,6 μ s. Nos dois trechos o aumento do registro t foram equivalentes, isto demonstra coerência nas respostas quando este sensor.

O solo utilizado neste experimento por ser de característica arenosa, apresenta poucas possibilidades de arranjos entre as partículas. Resultando em maiores quantidades de poros hidraulicamente funcionais (SOUZA, 2005), reduzindo assim a capacidade de reter água nos poros deste solo. Devido ao fato de pouca água ficar retida, neste tipo de solo, a medida em que a frente de molhamento atravessa o alcance do sensor, o solo é apenas umedecido (t de 23,7 μ s), porém o solo não satura. A saturação só ocorre com o acúmulo de água a partir do fundo do recipiente (t com o solo saturado 28 μ s). É devido a este fenômeno, que ocorre a formação do segundo degrau.

Este experimento demonstrou, que para solos de características texturais arenosas, o alcance do sensor também foi de 3 cm, como já visto quando utilizado com água destilada. Nesse tipo de experimento, pode se destacar a influência do alcance do sensor durante a

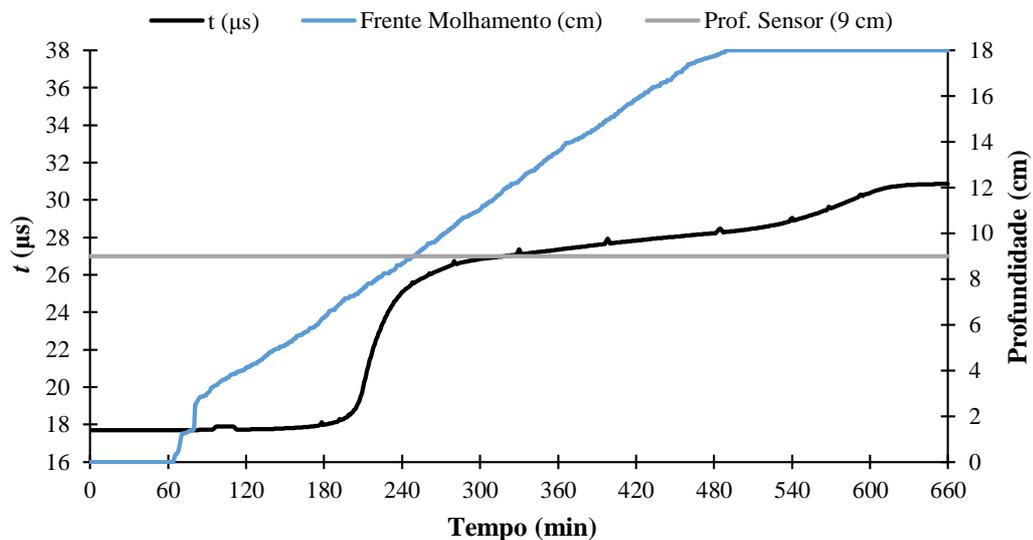
instalação do equipamento em um perfil de solo. A umidade volumétrica fornecida através da irrigação a partir da superfície do solo, monitorada pelo sensor de umidade, apresentará diferentes resultados, a depender da profundidade da inserção do guia de ondas, seja mais próxima ou distante da superfície. Ao final do experimento, é possível destacar importância de ter se determinado o alcance do sensor tipo TDR Cs616. Para este tipo de experimento fica claro a influência do alcance do sensor do equipamento nos resultados.

5.3.2 Experimento 5: Realizado com solo Franco, com massa específica de $1,55 \text{ g/cm}^3$ e volume de 11700 cm^3

O experimento foi realizado no dia 23 de julho do ano de 2014 e conduzido com solos tipo Franco, com valores de massa específica no ponto de coleta de $1,55 \text{ g/cm}^3$. O experimento foi conduzido com o intuito de elevar a umidade do solo seco, até a saturação. A irrigação ocorreu através de uma bomba peristáltica, com vazão de 8 mililitros por minuto. Esta foi realizada através de 18 gotejadores, com a vazão unitária em cada gotejador de 0,44 mililitros por minutos. O tempo total de irrigação para saturar o solo, neste experimento foi de 11 horas.

Os resultados deste experimento, que visa observar o comportamento tempo de resposta (t) do sensor em μs , em função do tempo (min) do experimento, inserido em um processo de saturação do solo, podem ser observados na Figura 23.

Figura 23 –Avanço da frente de molhamento e tempo de resposta do sensor (t), em função do tempo, no experimento com solos tipo Franco.



Fonte: O AUTOR(2015).

O t para o solo seco, no início do experimento foi de 17,69 μ s. O tipo de solo utilizado nesse experimento é o que apresenta maiores teores de silte, em sua composição. Como no experimento com o solo tipo Areia franca, após o acionamento da irrigação, o sensor não responde imediatamente ao aumento progressivo da umidade volumétrica (θ_v). O processo de infiltração nesse experimento, leva em torno de 170 minutos para atingir a região de alcance do sensor. Esse é o instante em que se inicia o primeiro degrau na Figura 23, correspondente a percepção do sensor ao aumento da umidade do solo através do fenômeno da infiltração.

A vazão utilizada na irrigação desse experimento foi menor (8 ml/min), do que no experimento com o solo tipo Areia franca. Por isto, no experimento anterior, com cerca de 50 minutos a infiltração alcança a região de alcance do sensor e nesse experimento foram necessários 170 minutos. Além do que, em solos siltosos, a infiltração se dá mais lenta do que em solos arenosos. Esta precaução foi tomada, visando evitar a ocorrência de acúmulo de água na superfície durante o experimento.

Como no experimentos anteriores, observa-se que a região de alcance do sensor, quando inserido no solo siltoso, também é de cerca de 3 cm, acima da haste do guia de ondas. Quando a infiltração avança aproximadamente 6 cm, é que o sensor começa a apresentar percepção ao aumento de umidade. Isto coincide com o início do primeiro degrau observado nos gráfico da Figura 23. No decorrer do processo de infiltração, esta atravessa toda a região de alcance do sensor, passando pelo guias de ondas do sensor (9 cm) até o limite inferior (12 cm), que corresponde ao fim do primeiro degrau, observado na Figura 23. O primeiro degrau corresponde ao t do sensor, a medida em que a infiltração atravessa sua região de alcance.

No experimento com o solo tipo Franco, observa-se um acréscimo maior nos valores do t durante a passagem da infiltração pela região que corresponde ao alcance do sensor, em relação ao solo tipo Areia franca. Para o solos tipo Franco o acréscimo foi em torno de 9,12 μ s, e para o solo tipo Areia franca de 7,2 μ s. O primeiro degrau no experimento com o solo tipo Franco se apresenta mais íngreme, do que no solo tipo Areia franca. Registrando acréscimos maiores do t em maior intervalo de tempo (148 min). O valores do t , durante esta etapa chegaram alcançaram até 27,02 μ s para o solos tipo Franco e 23,7 μ s para o solo tipo Areia franca.

Após a passagem da infiltração pela região de alcance do sensor, no experimento com o solo tipo Franco, observa-se uma tendência a constância no valores do tempo de resposta (t), comportamento também observado no solo arenoso. Seguindo da formação de um segundo degrau, atribuído ao processo de saturação. Este que ocorre após o umedecimento realizado da infiltração da água no solo. A infiltração quando alcançou o fundo do recipiente (18 cm), gerou

um acúmulo de água, saturando o solo de baixo para cima. Quando este acúmulo alcança novamente o alcance do sensor, observa-se acréscimo nos valores do tempo de resposta (t) em curto intervalo de tempo, refletido no segundo degrau dos gráficos.

Comparando os experimentos, o solo tipo Franco, apresenta o segundo degrau menor e mais suave que corresponde a variação do tempo de resposta de 1,62 μ s em 74 minutos em comparação com o solo arenoso que variou 2,75 μ s em 32 minutos. A diferença entre o solo apenas umedecido pela passagem da frente de molhamento e o solo saturado, é menor nos solos tipo Franco do que em solos tipo Areia franca. Isso é refletido na Figura 23, no primeiro degrau por ser apresentar maior e mais íngreme. E no segundo degrau, por se apresentar menor e mais suave, do que na Figura 22 do experimento com solos Areia franca.

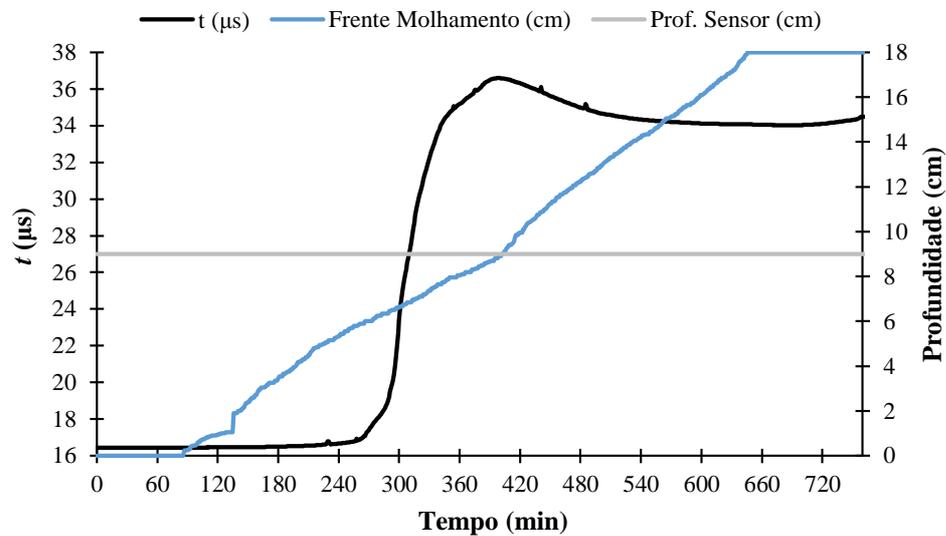
O solo utilizado neste experimento, apresenta maior capacidade de retenção de água em relação ao solo Areia franca. O solo siltoso apresenta mais microporos em seu arranjo, isso ocorre devido ao solo apresentar partículas solidas menores, possibilitando maior quantidades de arranjos, retendo mais água em seus poros. Em contrapartida o solo tipo Areia franca apresenta em sua composição partículas maiores, retendo menos água em seus poros, por apresentarem maior quantidade de poros hidraulicamente funcionais (SOUZA, 2005). A medida que a água infiltrou no perfil do solo, maiores teores de água ficaram retidos nos poros do solo siltoso, do que no solo arenoso.

5.3.3 Experimento 6: Realizado com solo Franco Argiloso, com massa específica de 1,55 g/cm³ e volume de 11700 cm³

Este experimento foi conduzido no dia 18 de novembro de 2014. E foi realizado com solo tipo Franco Argiloso. A massa específica natural apresentou valores de 1,38 g/cm³. A irrigação ocorreu através de uma bomba peristáltica, com vazão de 7 mililitros por minuto. Esta foi realizada através de 18 gotejadores e a vazão unitária em cada gotejador foi de 0,387 mililitros por minutos. O tempo total de irrigação para saturar o solo deste experimento foram de 12 horas 46 minutos.

Os resultados do experimento, que visa observar o comportamento do sensor de umidade CS616 através do tempo de resposta (t) em μ s, em função do tempo do experimento (em minutos), inserido em um processo de saturação do solo, pode ser observado na Figura 24.

Figura 24 – Avanço da frente de molhamento e tempo de resposta do sensor (t), em função do tempo, no experimento com solos tipo Franco Argiloso.



Fonte: O AUTOR(2015).

No experimento realizado com o solo tipo Franco argiloso o t era de $16,43 \mu\text{s}$, para o solo seco. O alcance do sensor quando utilizado neste tipo de solo, novamente, é cerca de 3 cm acima e abaixo do guia de ondas. Após o acionamento da irrigação, a frente de molhamento atinge a região correspondente ao alcance do sensor, com cerca de 260 minutos de experimento. Este é o instante em que o sensor registra os primeiros aumentos do t .

A vazão utilizada na irrigação, foi de 7 ml/min . Medida tomada na tentativa de evitar, o acúmulo de água na superfície do solo sem que o mesmo infiltre. O solo argiloso apresenta velocidade de infiltração mais lenta que as do demais solos abordados neste estudo. O degrau observado nos gráficos das Figura 24, coincide com a infiltração da água no solo, atravessando a região de alcance do sensor. Comportamento semelhante ao observado nos experimentos com o solo tipo Areia franca e o solo tipo Franco.

A percepção do sensor ao aumento da umidade no solo, diferentemente dos experimentos anteriores, ocorre de forma brusca. A subida do degrau tende a um ângulo de 90° . Nota-se um grande acréscimo dos valores do t , em um curto intervalo de tempo. Esta variação do t é a maior observada nos experimentos envolvendo o três tipos de solo. Observou-se uma variação de $19,49 \mu\text{s}$ em 136 minutos, chegando ao maior valor do t do experimento ($36,5 \mu\text{s}$).

O solo tipo Franco argiloso, apresenta a maior capacidade de retenção de água, entre os três solos utilizados. Ficando claro que a medida em que se iniciou o fornecimento de água ao experimento, à frente de molhamento à medida que infiltrava, o solo não estava apenas sendo

umedecido e sim saturado. A medida que a infiltração ocorria a quantidade máxima de água possível, ficava retida nos poros, já em possível estado de saturação. Nota-se, que está é a razão da ausência do segundo degrau no gráfico deste experimentos, atribuído aos outros experimentos pela saturação que ocorre com acúmulo de água em direção a superfície, após a infiltração alcançar o fundo do recipiente.

Nos t entre o instante em que a frente de molhamento atinge o limite superior do alcance do sensor (6 cm) e o instante em que a frente atinge o guia de ondas (9 cm) foi observado um acréscimo de 19,49 μ s como já foi demonstrado, porém, nos t entre o instante em que a frente atinge o guia de onda (9 cm) e o limite inferior (12 cm) do alcance do sensor a variação registrada foi de decréscimo de 1,46 μ s. Essa variação pode ser atribuída aos aumentos significativos dos teores de argila, de acordo com Villwock (2004) algumas particularidades, como a presença de elementos, por exemplo: os altos teores de Ferro e argila e a expansibilidade do solo, podem ocasionar alterações na resposta do sensor e calibrações são necessárias.

A expansibilidade pode ser entendida como uma característica dos solos finos argilosos que se traduz numa variação do seu volume, que se manifesta apenas quando ocorre um aumento do teor em água e a sua amplitude traduz o potencial expansivo do solo (FERREIRA, 2009)

Para o decréscimo nos valores do tempo de resposta observado nesse experimento, as seguintes hipóteses podem ser atribuídas: a) Essa diminuição nos valores da leitura também podem ser atribuídos a perturbação no momento da inserção do guia de ondas na montagem do experimento. No momento da inserção da haste do guia de ondas, devido a perturbação algum espaço com ar pode constar na região circundante do guia de ondas, diminuindo a densidade naquela região. A medida em que o avanço da frente de molhamento alcança o alcance do sensor, pode ter havido uma acúmulo de água justificando o pico nos valores da leitura. Porém, na sequência do experimento a água que estava circundando as hastes pode ter sido absorvida pelo solo. b) No momento em que a infiltração alcança o alcance do sensor, este apresenta o pico nos valores do tempo de resposta, a diminuição ocorre quando a infiltração toma toda o alcance do sensor. Nesse instante, a expansibilidade da argila aumenta o volume de vazios nessa região, diminuindo o volume de água em relação ao volume total de solo, fazendo com que o tempo de resposta diminua. Nota-se que após o decréscimo nos valores do tempo de resposta, o comportamento deste tende há um constância.

Uma análise minuciosa do tempo de resposta do sensor em função do valor da umidade volumétrica dos três solos utilizados, em estado de saturação, observamos que houve diferenças para cada tipo de solo. Verifica-se que para o solo arenoso, siltoso e argiloso tem-se que θ_v (%)

foi de 28, 31 e 34, respectivamente. Embora que esse efeito possa parecer aparentemente estranho, é importante notar que solos argilosos podem apresentar características de expansibilidade quando na saturação, o que foi inclusive observado um aumento de espessura de solo de aproximadamente 0,5 cm no caso do solo argiloso.

Neste caso, embora a quantidade de água seja a mesma no recipiente para os três tipos de solo, as seguintes hipóteses podem ser atribuídas para explicar o fato de se ter encontrado maior quantidade de água do que os demais solos: a) na região central onde se localiza o sensor pode haver um pouco mais de teor de água do que a região próxima à superfície. De fato, foi observado que no solo arenoso a lâmina de água aparece na superfície, enquanto que no solo argiloso isto não ocorreu, ou seja, a frente de saturação ficou um pouco abaixo da superfície. b) Em solos com maior teor de argila, possui um maior contraste de propriedades dielétricas do meio, nesse caso pode ter levado a maiores leitura do tempo de trânsito do sinal aplicado, e consequentemente a uma maior percepção de umidade volumétrica. c) Solos com maior teor de argila, se apresentam com maior capacidade de retenção da água no solo, possibilitando uma maior retenção de água na região da zona de medição do sensor.

5.4 Experimentos simulando irrigação, avaliando o desempenho do sensor em solos de Pernambuco

Como observado nos resultados dos experimentos descritos em 5.2.2 e 5.2.3, o alcance do sensor é de aproximadamente 3 cm quando utilizado em água destilada. Em 5.3.1, 5.3.2 e 5.3.3 foi observado que o alcance do sensor determinado, não sofre alteração quando utilizada nos diferentes tipos de solos, abordados neste estudo. Esse experimento foi configurado com o volume de solo no recipiente, que abrange apenas a região de alcance do sensor, com 3 cm acima e 3 cm abaixo do guia de ondas. Esta configuração experimental, se diferencia do experimento descrito no item 5.3, no tocante de altura do recipiente em que será preenchida com o solo (6 cm), altura de inserção do guia de ondas (3 cm) e a vazão. Nos três experimentos a vazão foi a mesma.

A proposta desse experimento, foi analisar a performance do sensor de umidade através da Equação (10). O experimento consiste em relacionar o tempo de resposta (t) do sensor em umidade volumétrica (θ_v), para os três tipos de solos coletados: Areia Franca, Franco e Franco Argiloso. Portanto, observar o desempenho do sensor tipo TDR Cs616, entre os três tipos de solos.

5.4.1 Experimentos simulando irrigação, com massa específica de 1,56 g/cm³ e volume de 3900 cm³

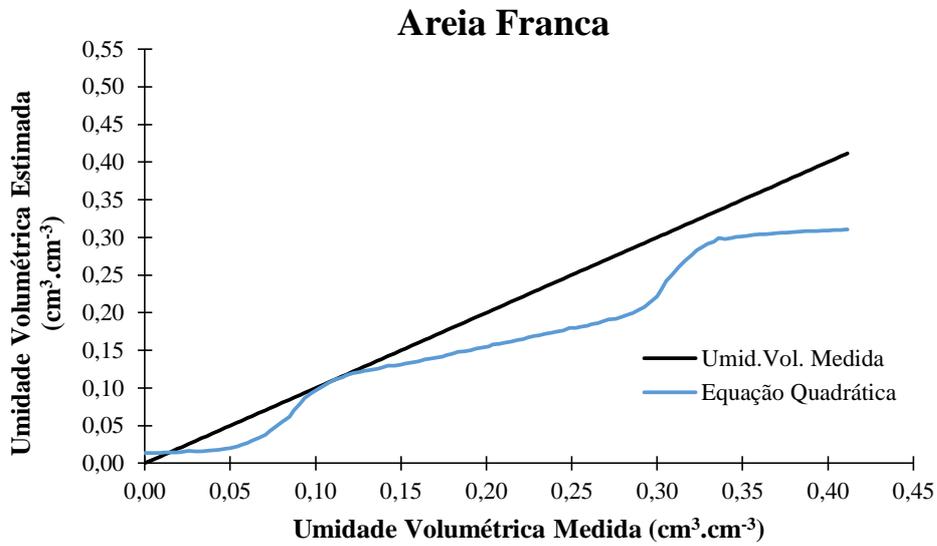
Este experimento foi realizado no Laboratório de Física dos Solos do Departamento de Energia Nuclear da UFPE. O mesmo foi conduzido com os três solos coletados: Areia Franca, Franco e Franco Argiloso coletados no município de São João-PE, Departamento de Energia Nuclear – Recife - PE e Serra Talhada - PE.

O experimento foi configurado com o preenchimento de 6090 g de solo no recipiente, reproduzindo artificialmente uma massa específica do solo de 1,56 g/cm³. Considerando a densidade da partícula 2,65 g/cm³, obteve-se porosidade de 41,07 %. Através da porosidade foi calculado, que a adição de 1.601,89 mililitros de água, seriam necessários para saturar o solo presente dentro do recipiente.

A irrigação ocorreu através de uma bomba peristáltica, com vazão de 15 mililitros por minuto. Esta foi realizada através de 18 gotejadores, com a vazão unitária em cada gotejador de 0,83 mililitros por minutos. O tempo total de irrigação para saturar o solo, neste experimento foi de 02 horas.

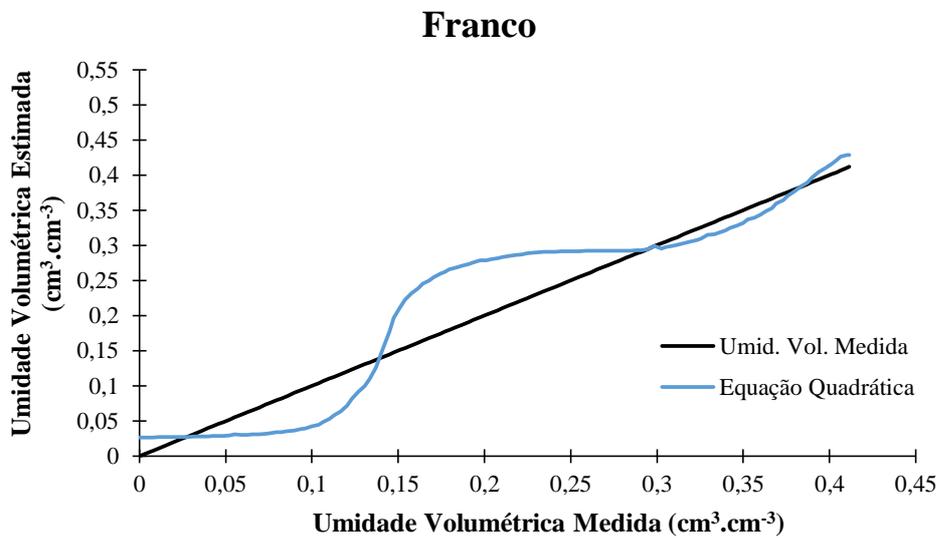
A umidade foi fornecida ao solo através de um processo de irrigação e monitorada gravimetricamente. Os resultados deste experimentos, que visa relacionar o tempo de resposta (t) em μ s, com a umidade volumétrica (θ_v) através de um processo de saturação do solo, podem ser observados nos gráficos das Figuras (25, 26 e 27) a seguir.

Figura 25 – Experimento realizado com solo tipo Areia Franca, onde se avaliou desempenho do sensor, através de uma equação de quadrática, para estimar Umidade Volumétrica (θ_v).



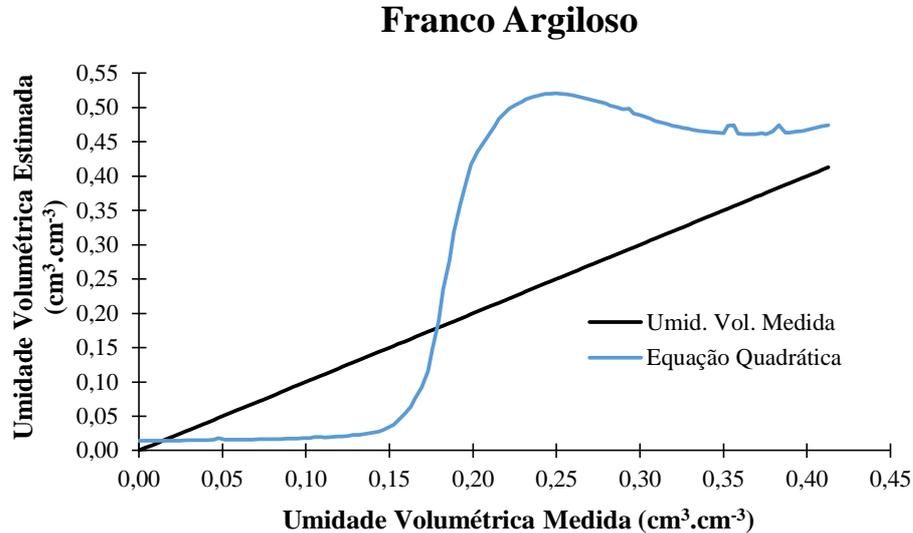
Fonte: O AUTOR(2015).

Figura 26 – Experimento realizado com solo tipo Franco, onde se avaliou o desempenho do sensor, através de uma equação de quadrática, para estimar Umidade Volumétrica (θ_v).



Fonte: O AUTOR(2015).

Figura 27 – Experimento realizado com solo tipo Franco Argiloso, onde se avaliou o desempenho do sensor, através de uma equação de quadrática, para estimar Umidade Volumétrica (θ_v).



Fonte: O AUTOR(2015).

Através das Figuras 25, 26 e 27, observa-se o comportamento da umidade volumétrica do solo estimada através da equação quadrática, em função da Umidade Volumétrica Medida, para os três tipos de solos estudados.

A análise dos experimentos foi dividida em três trechos. O trecho inicial, onde o solo começa a receber influência da umidade, o trecho seguinte onde o solo está em processo umedecimento e o trecho final onde o solo alcança a saturação.

Na Figura 25, é apresentado o desempenho da equação quadrática para o solo tipo Areia franca, observa-se que no trecho inicial, o experimento apresenta valores estimados e medido muito próximos de zero. Porém o estimado ainda superestima mesmo que pouco, os valores medidos. O modelo teórico subestima os dados experimentais, em praticamente todo processo de saturação. Apenas se equiparando com os dados medidos no intervalo de 10 a 12 % umidade estimada. Até o fornecimento cerca de 10 % de umidade fornecida, essa subestimação gira em torno de 4 % de umidade estimada. No segundo e no terceiro trecho os valores estimados se comportam semelhantemente subestimando os valores medidos em torno de 10 %, está também é a diferença para o solo saturado.

Na Figura 26, é apresentado o desempenho da equação quadrática para o solo tipo Franco. Observando o gráfico de maneira geral, os valores estimados no trecho inicial subestimam os valores medidos, no segundo trecho os dados estimados passam a superestimar

e no terceiro trecho os dados estimados se equiparam ao dados medidos. Destrinchando o gráfico, observa-se que na origem com o solo seco, os dados estimados superestimam mesmo que pouco os dados medidos. Com o início do processo de saturação, no trecho inicial do experimento os dados estimados subestimam em cerca de 6% os dados medidos, logo no próximo trecho o comportamento inverte, e os dados estimados passam a superestimar em cerca de 8% os medidos. A partir desse ponto os dados calculado pelo modelo quadrático, se equiparam aos medido, até o final do experimento e ao fim do experimento com o solo saturado tanto o medido como o estimado apresentam 40 % de umidade volumétrica.

No gráfico da Figura 27, de forma geral o comportamento dos valores calculados se mostram diferenciado dos valores medidos, analisando o gráfico observa-se que dados medidos e estimados se assemelham apenas na origem do experimento com o solo seco. A seguir os dados estimados subestimam e os medidos, e com 15 % de umidade volumétrica fornecida ocorre a inversão de comportamento, onde o estimado passa a superestimar o medido, e não acompanha o comportamento, alcançando diferenças de até 30 % de umidade volumétrica. Observa-se que o comportamento do sensor inseridos em solos com alto teores de argila se assemelha ao experimento 4.3.3 onde tempo de resposta do sensor (t), também realizado com solo argiloso alcança um pico e depois decresce e estabiliza. Esse comportamento do modelo calculado se apresenta muito diferente dos dados observado no experimento. Destacando a ineficiência do modelo para este tipo de solo.

5.4 Análise estatística

Foi realizada a análise estatística, entre os valores de umidade volumétrica encontrados experimentalmente e os valores estimados pela equação quadrática. Os parâmetros analisados foram o EQM, RD, EM, CRM, R e R^2 , os resultados da análise estatística são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Resultado da análise estatística sobre a comparação entre os valores experimentais obtidos e os estimados pela equação quadrática.

Solo	EQM (%)	RD	EM	CRM	R^2	R
Areia Franca	24,763	1,247	0,808	0,207	0,971	0,985
Franco	20,644	0,815	0,867	-0,046	0,900	0,948
Franco Argiloso	71,955	0,258	-0,599	-0,345	0,760	0,872

Fonte: O AUTOR(2015).

Os menores valores de EQM, foram obtidos para os experimentos realizados com o solo Franco (20,6 %) e Areia Franca (24,7 %). Demonstrando, que os valores do modelo teórico calculado, apresentam baixo grau de desvio em relação aos dados experimentais, para estes dois tipos de solos. O valor de EQM para o solo Franco Argiloso, demonstra que o grau de desvio é alto dos dados calculados pelo modelo teórico, cerca de 72%.

Valores de RD e EM próximo de 1 (um) foram obtido apenas para os experimentos realizado com o solo Franco e Areia Franca. Para o solo Franco os valores de RD e EM são de 0,815 e 0,867. Para o solo tipo Areia franca os valores de RD e EM foram de 1,24 e 0,808. Para o experimento com solo Franco Argiloso os valores de RD e EM não se mostram consistentes.

Valores de CMR próximo de zero, foram obtidos apenas nos experimentos com solo Areia Franca (0,20) e com o solo Franco (-0,04). O experimento realizado com solo Franco Argiloso (-0,34), apresentou o pior resultado. Observa se que o único solo em que o modelo calculado subestimou consideravelmente durante todo o experimento o medido foi o realizado com o solo Areia Franca, devido ao valor de CMR positivo.

Quanto maior o R^2 , mais explicativo é modelo, melhor ele se ajusta à amostra, portanto, o experimento que apresentou o modelo com melhor ajuste foi o realizado com solo tipo Areia Franca, seguido do solo Franco. O solo que apresentou o pior ajuste, foi o argiloso. O coeficiente de correlação (R), apresentou o mesmo comportamento do coeficiente de determinação.

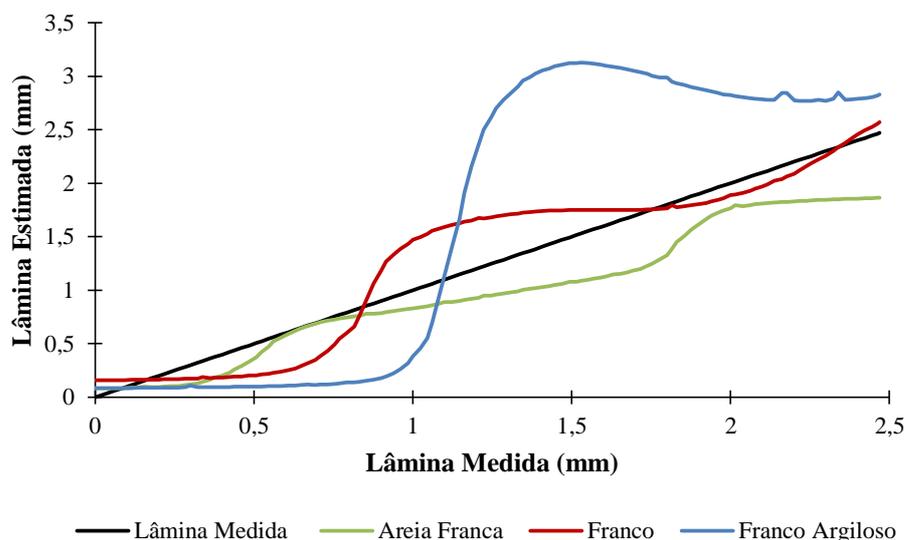
Globalmente, como mostra o resultado da análise estatística, a equação quadrática é mais recomendada, para solos com características texturais arenosa e siltosa em comparação com o solo argiloso que apresentou os piores resultados estatísticos, embora superestime ou subestime em varios trechos da curva. Para o solo com alto teor de argila, como no caso do solo tipo Franco Argiloso abordado nesse estudo, o modelo teórico não apresentou bons resultados.

5.5 Impacto da estimativa da umidade volumétrica no armazenamento de água no solo

Foram calculadas lâminas de água, correspondentes as umidades volumétricas estimadas pelo modelo quadrático e correspondentes as umidades volumétricas experimentais. As umidades volumétricas utilizadas, são provenientes dos experimentos descritos no item

5.4.1, com os três tipos de solos: Areia franca, Franco e Franco Argiloso. As lâminas de água são demonstradas na Figura 28.

Figura 28 – Lâminas medidas em função das lâminas estimadas, nos experimentos com 6 cm de profundidade, realizado com os solos tipo Areia Franca, Franco e Franco Argiloso.



Fonte: O AUTOR (2015)

Na etapa inicial dos experimentos, com cerca de 0,7 mm de lâmina aplicada, os três tipos de solos apresentam diferentes comportamentos, mas se assemelham devido ao fato que até este ponto, o equipamento subestima os valores medidos nos três casos. O solo Franco Argiloso destaca-se por apresentar a maior subestimação em relação aos outros casos, subestimando aproximadamente 0,7 mm os valores medidos.

Posteriormente, os valores estimados aumentam significativamente nos três casos. O caso do solo Areia Franca, ainda permanece subestimando os medidos mesmo com o aumento observado. No caso dos solos Franco e Franco Argiloso, os dois passaram a superestimar os valores experimentais. As superestimações alcançaram até 0,5 mm e 1,6 mm de lâmina respectivamente, estas ocorrem com cerca de 0,85 mm de lâmina aplicada para o caso do solo Franco e 1,44 mm de lâmina aplicada para o caso do solo Franco Argiloso.

Ao final do experimento com o solo Areia Franca, subestima em 0,6 mm de lâmina os valores medidos, que é a maior observada para este caso. Com o solo Franco o modelo estimado apresenta um comportamento semelhante ao modelo medido, durante o trecho final do experimento. Para o solo Franco Argiloso, ao final do experimento, o modelo estimado superestima os valores medidos em 0,35 mm.

Durante o processo de saturação nos três casos de solos utilizados, como solo arenoso, o modelo quadrático utilizado como base para estimar as lâminas de água presentes no sistema, subestima em 20 % os valores medidos experimentalmente. O solo Franco superestima os valores medidos em cerca de 3 % e o solo Franco Argiloso superestima em cerca de 32 %.

É importante destacar, que os experimentos cujo os resultados foram discutidos acima, o sensor foi inserido em uma montagem experimental, onde a espessura de solo no recipiente foi de 6 cm. Está é a espessura ótima, que corresponde a região de atuação do sensor, como já visto, de 3 cm acima e 3 cm abaixo do guia de ondas.

Realizando a análise das lâminas aplicadas nos experimentos com espessura de 18 cm de solo, cujo os gráficos podem ser observados nas Figuras 35, 36 e 37. O erro máximos nas estimativas no experimento com o solo arenoso é uma subestimação de 1,89 mm. Para o solo siltoso à superestimação da lâmina medida alcançou 1,62 mm e para o solo argiloso à superestimação chegou a 7,65 mm. Realizando uma comparação entre os dois tipos de experimentos, nota se a existência de um erro maior na estimativa do armazenamento de água no solo, nos experimentos com maior espessura (18 cm).

Portanto, utilizar este equipamento para monitorar a umidade em um perfil do solo, é fundamental no momento da instalação do equipamento, determinar o número de sensores e profundidade de instalação em função das dimensões do alcance do sensor 3 cm acima e 3 cm abaixo do guia sensor. Este tipo de análise, apresenta um olhar mais prático dos resultados obtidos por este estudo. Considerando que este equipamento possa vir a ser utilizado para o controle de um sistema de irrigação, por exemplo, é importante destacar em volume por área (lâmina de água aplicada), a quantidade de água que possa vir a ser desperdiçada, devido a uma superestimação, ou à quantidade de água que não seja disponibilizada corretamente, devido a uma subestimação do equipamento.

5.6 Calibrações

A partir da análise estatística realizada, onde se avaliou o desempenho da equação quadrática, para estimar umidade volumétrica (θ_v), observou se que para os solos arenosos e siltosos, a equação quadrática apresenta um desempenho razoável, mas com alguns desvios superestimando ou subestimando consideravelmente, em algumas etapas experimentais. Para solos argilosos a equação quadrática não apresentou bons resultados. Portanto o sensor CS616

foi calibrado, com o objetivo de otimizar o seu desempenho quando utilizado em solos tipo Areia Franca, Franco e Franco Argiloso.

O objetivo das calibrações, é propor equações que relacionem o tempo de resposta do sensor (t) com a umidade volumétrica (θ_v) para os três tipos de solos abordados nesse estudo.

A seguir são apresentados na Tabela 4, os valores das massas de água aplicadas experimentalmente por etapa. Essas massas de água aplicadas, correspondem a 10 valores de umidade volumétricas (θ_v), totalizando em dez pontos de calibrações.

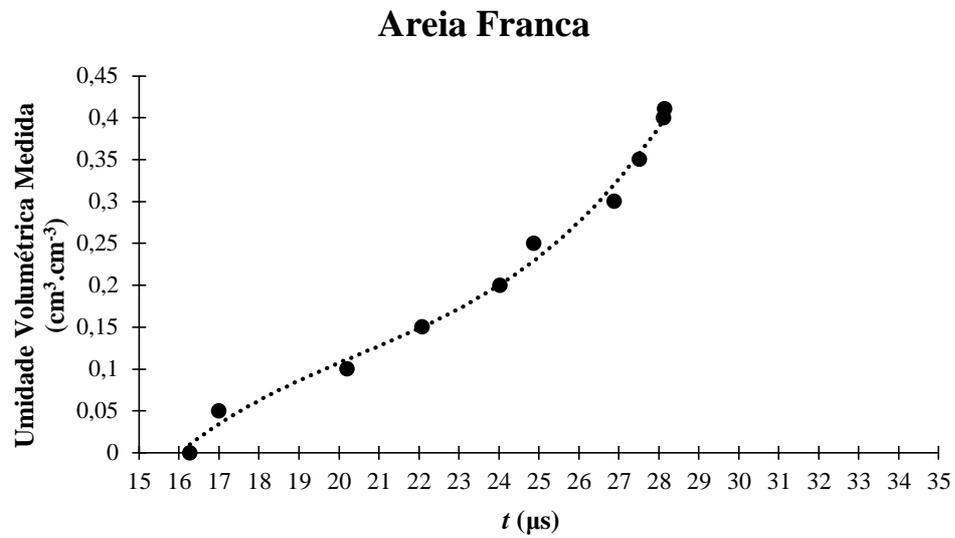
Tabela 4 – Massa de água (g) e Umidade volumétrica (θ_v) aplicada por etapa nos experimentos de calibração.

Etapa	Massa de Água (g)	Umidade Volumétrica ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$)
1°	0	0
2°	195	0,5
3°	390	0,10
4°	585	0,15
5°	780	0,20
6°	975	0,25
7°	1170	0,30
8°	1365	0,35
9°	1560	0,40
10°	1601,73	0,41

Fonte: O AUTOR(2015).

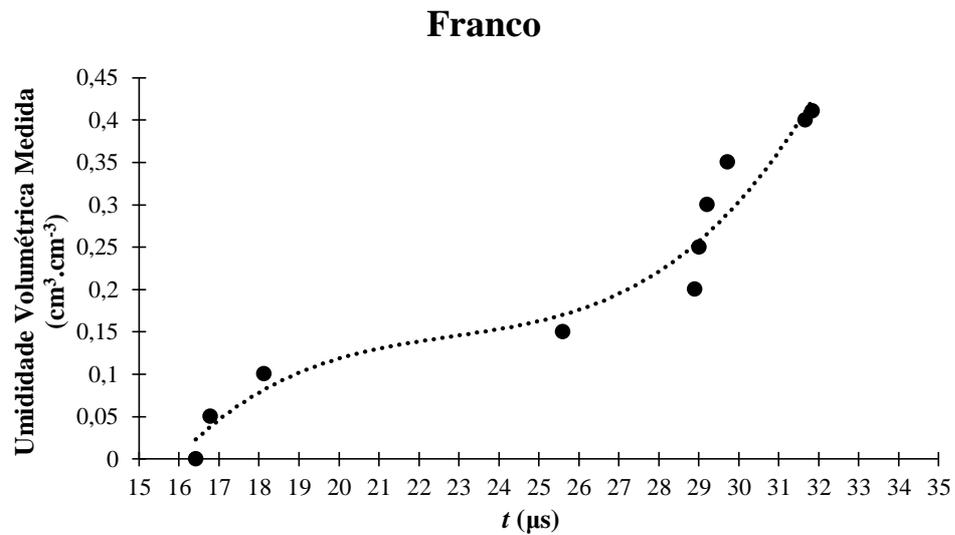
Os resultados dos experimentos de calibração do sensor de umidade CS616, podem ser observados nas Figuras 29, 30 e 31 onde é observado o comportamento das leituras dos tempos de respostas (t) do sensor, em função da umidade volumétrica ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$) aplicadas experimentalmente no solo, durante a calibração.

Figura 29 – Pontos da calibração realizada com o solo Areia Franca.



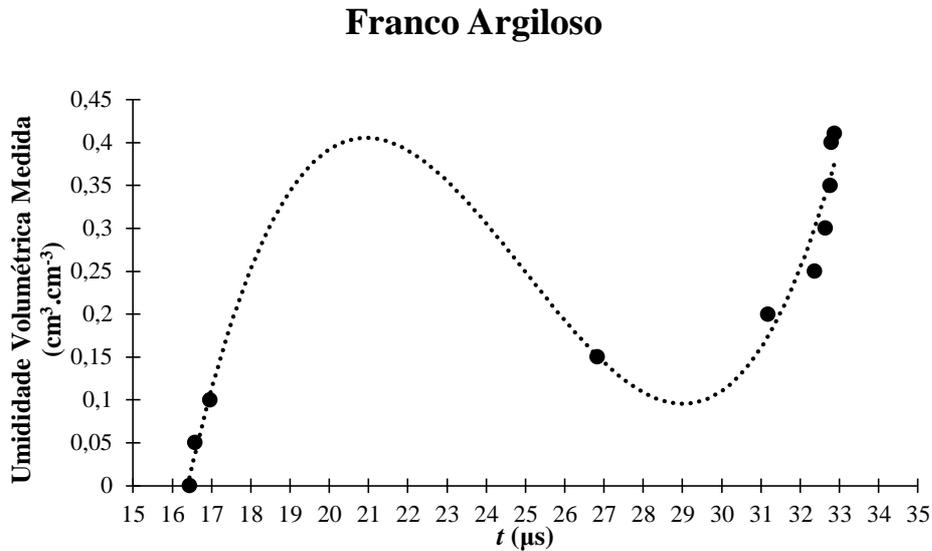
Fonte: O AUTOR(2015).

Figura 30 – Pontos da calibração realizada com o solo tipo Franco.



Fonte: O AUTOR(2015).

Figura 31 – Pontos da calibração realizada com o solo tipo Franco Argiloso.



Fonte: O AUTOR(2015).

Analisando o resultados das calibrações, observa se que a leitura do tempo de resposta do sensor (t) para o solo seco, nos três casos é cerca de 16 μs .

Na calibração realizada com o solo tipo Areia franca, as leituras dos tempos de resposta (t) variam em média de 1,32 μs entre os pontos de umidade volumétrica ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$) aplicados, durante toda a calibração, a maior variação (3,21 μs) foi observada no intervalo de 0,05 a 0,1 $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$.

Na calibração do sensor para o solo tipo Franco, a variação nos tempos de resposta (t) em média para todo o experimento foi de 1,71 μs . Este tipo de solo se diferencia do experimento com o solo tipo Areia Franca, devido a no intervalo de 0,1 a 0,15 $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ e 0,15 a 0,2 $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ apresentar uma variação mais brusca no tempo de resposta do sensor (t) de 7,48 e 3,3 μs respectivamente.

No experimento de calibração do sensor, para o solo tipo Franco Argiloso, o comportamento é semelhante, as diferenças encontradas em relação ao demais solos é que no intervalo de 0,1 a 0,15 $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ e 0,15 a 0,2 $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ apresentar as maiores variações nos tempos de resposta do sensor (t) de 9,86 e 4,36 μs respectivamente, em média para todo o experimento a variação é de 1,82 μs .

Ao final dos experimentos de calibração, foram realizados ajustes entre os valores, afim de se obter equações, que relacionem o tempo de resposta (t) com a umidade volumétrica ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$) de maneira mais eficiente que a equação quadrática, extraída do manual do sensor. Coelho et al. (2006) ressaltam que os modelos de calibração variam conforme o tipo de solo e

que um modelo polinomial de terceiro grau pode ser calibrado com exatidão para cada situação de solo.

Ajustando os dados obtidos dos experimentos para os três tipos de solo, observou-se que uma equação polinomial de 3º grau (Equação 20), apresentou bom ajuste entre os valores.

$$\theta_v = C0 + C1 \cdot t + C2 \cdot t^2 + C3 \cdot t^3 \quad (20)$$

Na qual, θ_v é a umidade volumétrica expressa em $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$, t é o tempo de resposta do sensor expresso em μs e $C0$, $C1$, $C2$ e $C3$ são os coeficientes da equação polinomial de terceiro grau.

A seguir são apresentados na Tabela 5, os parâmetros da equação polinomial de terceiro grau, para cada tipo de solo estudado, obtidos através da calibração do sensor, e seus respectivos valores do coeficiente de determinação (R^2), indicando o grau de ajuste da equação proposta.

Tabela 5 - Coeficientes da equação polinomial de terceiro grau para os três tipos de solos, com seus respectivos valores de coeficiente de determinação.

Solo	C0	C1	C2	C3	R ²
Areia Franca	-2,7799	0,3834	-0,0177	0,0003	0,9919
Franco	-3,5281	0,4691	-0,0203	0,0003	0,9505
Franco Argiloso	-16,663	2,1468	-0,0883	0,0012	0,9593

Fonte: O AUTOR(2015).

Analisando os valores do coeficiente de determinação obtido nos experimentos de calibração, observamos que o modelo polinomial de terceiro grau relaciona bem as variáveis para os três tipos de solos. O coeficiente de determinação (R^2) tende a 1 (um), quando o modelo é mais explicativo e melhor se ajusta a amostra, portanto valores próximos de 1 (um), foram obtidos para os três tipos de solos, R^2 de 0,99 para o solo tipo Areia Franca, 0,95 para o solo tipo Franco e 0,95 para o solo tipo Franco Argiloso.

6 CONCLUSÕES

Este trabalho avaliou a performance de um sensor tipo TDR para três diferentes solos do estado de Pernambuco. A partir da realização dos experimentos é possível concluir o seguinte:

- 1) O alcance do sensor de umidade tipo TDR CS616 da Campbell Sci é de aproximadamente de 3 cm acima e abaixo do sensor e que não varia de acordo com a textura do solo, seja para solos com maiores teores de argila, solos com maiores teores de silte e solos com maiores teores areia;
- 2) A equação quadrática fornecida pelo fabricante do sensor de umidade CS616, não apresentou um bom desempenho para os solos estudados. Para o solo arenoso o sensor subestimou os valores medidos em 20 %, para o solo siltoso superestimou os valores medidos em 4 %, já para o solo argiloso, a superestimação foi de 34 %;
- 3) O erro quantitativo na estimativa do armazenamento de água, aumenta significativamente quando o sensor de umidade é utilizado em uma profundidade de solo maior que a correspondente a região de atuação do sensor, tornando fundamental considerar este parâmetro, quando se monitora a umidade em um perfil de solo;
- 4) A calibração realizada demonstra que um modelo de terceiro grau, apresenta bom ajuste entre os valores medidos e estimados, com valores de coeficiente de determinação superiores a 95%.

RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Ao fim desse estudo, pode se recomendar trabalhos, visando complementar a pesquisa para estes tipos de sensores, tão importantes para o monitoramento da umidade do solo, afim de aumentar o conhecimento sobre este sensor em solos tropicais e tornar a aferição deste mais precisa.

- 1) A partir desse estudo, pode-se realizar calibrações recomendadas na metodologia desse trabalho, para as diferentes possibilidades texturais de solo, tomando-se base o triângulo textural, onde cada calibração apresentaria uma equação característica. Um programa computacional poderia ser desenvolvido, onde se informaria os teores de Argila, Areia e Silte e o programa forneceria a equação de calibração característica para a textura correspondente.
- 2) Seria interessante a realização da metodologia apresenta nesse estudo, sem condições de contorno inferior, visando analisar a influência desta nas resposta do sensor, com implantação ao recipiente de um sistema de drenagem, condicionando o experimento a uma situação mais realista do ponto de vista do solo na natureza
- 3) Recomenda se a execução de ensaios visando analisar, o efeito da dinâmica da água e de atributos físicos do solo na resposta do sensor de umidade CS616, onde o sensor esteja inserido no solo na posição vertical, utilizando se um recipiente cilíndrico de acrílico para permitir a visualização do avanço da frente molhamento e com diâmetro de 3 cm coincidindo com o alcance do sensor de umidade. O experimento poderia ser conduzido com os mesmo solos (Areia franca, Franco e Franco Argiloso) utilizados neste estudo para posteriores comparações.

REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, P. E. P. D.; DURÃES, F. O. M. **Uso e manejo de irrigação**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2008. 528 p.

AGÊNCIA PERNAMBUCANA DE ÁGUAS E CLIMA - APAC. Disponível em: <<http://www.apac.pe.gov.br>>. Acesso em: 05 jul. 2013.

ÁVILA, L. F.; MELLO, C. R.; SILVA, A. M. Continuidade e distribuição espacial da umidade do solo em bacia hidrográfica da Serra da Mantiqueira. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v.14, n.12, p.1257–1266, Campina Grande, PB. 2010.

BACCHI, O.O.S.; REICHARDT, K.; OLIVEIRA, J. C. M.; NIELSEN, D.R. Gamma-ray beam attenuation as an auxiliary technique for the evaluation of soil water retention curve. *Science Agricola*, Piracicaba, v.55, p.499-502, 1998.

BELL, J. P. **Neutron probe practice**. 3.ed. Wallingford, Institute of Hydrology, 1987. 51p.

BERGAMASCHI, H.; DALMAGO, G.A.; COMIRAN, F.; BERGONCI, J.I.; MÜLLER, A.G.; FRANÇA, S.; SANTOS, A.O.; RADIN, B.; C.A.M.; PEREIRA, P.G. Deficit hídrico e produtividade na cultura do milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.41, n.2, p.243-249, 2006.

BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. **Manual de Irrigação**. 8.ed. Viçosa: UFV, 2006, 625p.

BRADY, N. C.; WEIL, R. R. **The nature and properties of soils**. 14th ed. New Jersey: Prentice Hall, 2008.

BRAGANÇA, R.; BRUM, V.J.; SILVA, J.M. da; ZINI JUNIOR, A.; BREGONCI, I. dos S.; REIS, E.F. dos; PASSOS, R.R. Avaliação da umidade de um Latossolo da região sul do estado do Espírito Santo por diferentes métodos de determinação. In: IX Encontro Latino Americano de Iniciação Científica, 2005, São José dos Campos. Anais. 2005, v.único, p.643-646.

BRITO, A. dos S. LIBARDI, P.L.; MOTA, J.C.A.; MORAES, S.O. Desempenho do tensiômetro com diferentes sistemas de leitura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.33, n.1, p.17-24, 2009.

CAMPBELL SCIENTIFIC, INC. CS616 and CS625 Water Content Reflectometers. Logan, Utah. U.S.A. (2011).

CECÍLIO, R.A.; SILVA, D.D.; PRUSKI, F.F.; MARTINEZ, M.A. Modelagem da infiltração de água no solo sob condições de estratificação utilizando-se a equação de Green-Ampt. **Revista Brasileira Engenharia Agrícola e Ambiental**. n. 7 p. 415-422, 2003.

COELHO, S.L.; TEIXEIRA, A. dos S. Avaliação do tensiômetro eletrônico no monitoramento do potencial matricial de água no solo. **Engenharia Agrícola**, v.24, n.3, p.536-545, 2004.

COELHO, E. F.; VELLAME, L. M.; COELHO FILHO, M. A.; LEDO, C. A. S. Desempenho de modelos de calibração de guias de ondas acopladas a TDR e a multiplexadores em três tipos de solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. n. 30. p. 23-30, 2006.

COLLIN R. E. Microondas, McGraw-Hill, São Paulo, 1992.

CORRADINI, C. Soil Moisture in the Development of Hydrological Processes and its Determination at Different Spatial Scales. **Journal of Hydrology**. v.516, p.1-5. 2014.

DAVIS, J. L.; CHUDOBIAK, W. J. In situ meter for measuring relative permittivity of soils. Geol. Surv. Can. Part A Paper, [S. L.], v. 75. 1975.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema brasileiro de classificação de solos. Brasília, SPI/ CNPS, 1999. 412p

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema brasileiro de classificação de solos. 2.ed. Rio de Janeiro, Embrapa Solos, 2006. 306p.

FERREIRA, S.R.M. ; FERREIRA, M.G.V.X. Mudanças de Volume Devido à Variação do Teor de Água em um Vertissolo no Semiárido de Pernambuco. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v.33 p.779-791, 2009.

GARDNER, C.M.K.; ROBINSON, D.; BLYTH, K.; COOPER, J.D. Soil water content. In: SMITH, K.A.; MULLINS, C.E. (Ed). Soil and environmental analysis. 2.ed. New York: Marcel Dekker Inc., 2000, p.1-64.

GOLFARI, L.; CASER, R.L; MOURA, V.P.G (1978). “Zoneamento ecológico da região Nordeste para experimentação florestal (2a aproximação)”. Belo Horizonte: PRODEPEF/Centro de Pesquisa Florestal do Cerrado. 66p. (PNUD/FAO/IBDF/BRA-45). (PRODEPEF. Série Técnica, 11).

GONÇALVES, A. C. A.; TRINTINALHA, M. A.; TORMENTA, C. A.; FOLEGATTI, M. V. Influencia da densidade do solo na estimativa da umidade em um nitossolo vermelho distroférico, por meio da técnica TDR. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v. 35. p. 1551-1559, 2011.

HILLEL, D. Fundamentals of soil physics. London: Academic Press, 1980. 413 p.

HUANG, F.H.; DOWDING, C. H. (1998). Telemetric and multiplexing enhancement of time domain reflectometry measurements. <http://iti.acns.nwu.edu/pubs/telemetry.pdf>

HUISMAN, J.A.; HUBBARD, S.S.; REDMAN, J.D.; ANNAN A.P. Measuring Soil Water Content with Ground Penetrating Radar: A Review. **Vadose Zone Journal**. v.2 p. 476-491, 2013.

KAISER, D. R. ; REINERT, D. J. ; REICHERT, J. M. ; MINELLA, J. P. G. Dielectric constant obtained from TDR and volumetric moisture of soils in southern Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. n. 34. p. 649-658, 2010.

KLAR, A.E. **A água no sistema solo-planta-atmosfera**. São Paulo: Nobel, 1984. 408p.

KLAR, A. E. **A água no sistema solo-planta-atmosfera**. 2.ed. São Paulo: Nobel, 1988, 408p.

KLEIN, V. A. **Física do solo**. Passo Fundo: Ediupf, 2008.

LACERDA, D.R.; GUERRA, H. O.C.; JUNIOR, G.B.; CAVALCANTI, M. L. F. Avaliação de um TDR para determinação do conteúdo de água do solo. **Revista de Biologia e Ciência da Terra**, Vol.5, n. 1, 2005.

LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no solo**. 1. ed. Piracicaba, 1995. 497 p.

LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no Solo**. Editado pelo autor, 1999. 497 p.

LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no solo**. São Paulo: Edusp, 2005.

LIBARDI, P.L.; Água no solo. In: VAN LIER, Q.J. **Física do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2010, p.103-152.

LIETH, J. H.; OKI, L. R. Irrigation in soilless production. In: RAVIV, M.; LIETH, J.H. (Ed). **Soilless Culture: theory and practice**. Elsevier Science, 2008, p.117-158.

LIMA, J. R. S.; DANTAS ANTONINO, A. C.; ANDRADE, A. P.; SOUZA, C.; SOARES, W. A.; SOUZA, E. S.; DA SILVA, I. F. Comparação da Sondas de Nêutrons e de Sensores Tipo TDR para a Determinação dos Componentes do Balanço Hídrico no Solo e Evapotranspiração do Feijão Caupi. **Agropecuária Técnica**, v.27, n.1, p.21–29, 2006.

MACEDO, A.B.M. **Produção e eficiência de uso da água da bananeira cv Pacovan Ken sob diferentes tensões de água no solo**. 2008. 63f. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

MALICKI, M.A.; PLAGGE, R.; ROTH, C.H. Improving calibration of dielectric TDR soil moisture determination taking into account the solid soil. **European Journal of Soil Science**. v.47, p.357-366, 1996.

MANIERE, J. M.; VAZ, C. M. P.; MARIA, I. C. Sondas espiral de TDR para a medida da umidade no perfil do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. n. 31. p. 191-198, 2007.

MINELLA, J.P.G.; PREVEDELLO, C.L.; KOBAYAMA, M.; MANFROI, O.J. Calibração do TDR para um latossolo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 28.,1999, Pelotas. **Anais...Pelotas: SBEA, 1999. 1CD-ROM**.

MANTOVANI, E. C.; BERNARDO, S.; PALARETTI, L. F. **Irrigação: princípios e métodos**. 3. ed. atual. Viçosa: Ed. UFV, 2009. 355p.

MIRANDA, F.R. de; SANTANA, M.G.S. de; SOUZA, C.C.M. de; OLIVEIRA, C.H.C. de. Calibração do sensor dielétrico ECH2O em dois tipos de solo. **Revista Ciência Agronômica**, v.38, n.3, p.317-321, 2007.

MUÑOZ-CARPENA, R.; RITTER, A.; BOSCH, D. Field methods for monitoring soil water status. In: MUÑOZ- CARPENA, R.; BENEDÍ, J.A. (Ed). **Soil-water-solute process characterization: an integrated approach**. CRC Press, 2005, p.167-193.

NASCIMENTO, P. dos S. **Manejo da viticultura irrigada no Semiárido com base em zonas homogêneas do solo e da planta**. 2013. 140f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Faculdade de Ciências Agrônomicas, Botucatu.

OLITTA, F. A. Construção de tensiômetros para controle da irrigação. *O Solo*. Piracicaba. v. 68, n. 2, p. 16-20, 1955.

OR, D.; WRAITH, J.M. **Agricultural and environmental soil physics**. Logan, Utah State University, 1997. 218p.

PALTINEANU, I. C.; STARR, J. L. Real-time soil water dynamics using multisensory capacitance probes: laboratory calibration. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Madison-WI, v.61, p.1576-1585, nov-dec, 1997.

PARIS D. T.; HURD F. K., *Teoria Eletromagnética Básica*, Guanabara Dois, Rio de Janeiro, 1984.

REICHARDT, K. **Processos de Transferência no Sistema Solo-Planta-Atmosfera**. Campinas, fundação Cargill, 1985. 446p

REICHARDT, K. **A água em sistemas agrícolas**. São Paulo: Manole, 1987. 188 p.

REICHARDT, K. *Dinâmica da matéria e da energia em ecossistemas*. Piracicaba: Depto. de Física e Meteorologia, USP/ESALQ, 1996. 513p.

REICHARDT, K.; TIMM, L.C. **Solo, Planta e Atmosfera: conceitos, processos e aplicações**. São Paulo: Editora Manole, 2004. 478 p.

ROMANO, N. Soil Moisture at Local Scale: Measurements and Simulations. **Journal of Hydrology**. v.516 p.6-20. 2014.

ROTH, C.H.; MALICKI, M.A.; PLAGGE, R. Empirical evaluation of the relationship between soil dielectric constant and volumetric water content as the basis for calibrating soil moisture measurements by TDR. **Journal of Soil Science**. v. 43 p. 1-13, 1992.

SANTOS, J.C.B.; SOUZA JÚNIOR, V.S.; CORRÊA, M.M.; RIBEIRO, M.R.; ALMEIDA, M.C.; BORGES, L.E.P. Caracterização de Neossolos Regolíticos da região semiárida do Estado de Pernambuco. *R. Bras. Ci. Solo*, 36:683-696, 2012.

SANTOS, L. A. P. *Aplicações da técnica TDR em física do solo*, Notas de aula, Prof. Luiz Antonio P. Santos, 2013.

SANTOS, L. A. P. Developpement d'une Nouvelle Methode de Determination des Profils de Teneur Eau dans les Sols par Inversion d'un Signal TDR, PhD Thesis, Universite Joseph Fourier, Grenoble (1997).

SANTOS, R.F.; CARLESSO, R. Déficit hídrico e os processos morfológico e fisiológico das plantas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.2, n.3, p.287-294, 1998.

SANTOS, M. R.; ZONTA, J. H.; MARTINEZ, M. A. Influência do tipo de amostragem na constante dielétrica do solo e na calibração de sondas TDR. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**. v.34 n. 02 p. 299-307, 2010.

SANTOS, H. G.; JAACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H.; OLIVEIRA, V. A.; OLIVEIRA, J. B.; COELHO, M. R.; LUMBRERAS, J. F.; CUNHA, T. J. F., (Ed.). Sistema Brasileiro de Classificação de solos, 3. ed. rev. ampl. Brasília, DF: EMBRAPA, 2013. 353 p.

SCHAAP, M.G.; LANGE, L.; HEIMOVAARA, T.J. TDR calibration of organic forest floor media. **Soil Technology**. vol. 11, p. 205-217, 1996.

SILVA, C. R.; ANDRADE JÚNIOR, S. A.; SOUZA, C. F. **Aspectos práticos na utilização da técnica de capacitância: desafios e aprendizagem**. In: SOUZA, C. F.; VARALLO, A. C. T.; LOPES, L. N.; SANTORO, B. L. (Org.). Aplicações de técnicas eletromagnéticas para o monitoramento ambiental. Taubaté: Universidade de Taubaté - UNITAU, 2008, v.1, p.25-45.

SILVA, E. L.; GERVÁSIO, E. S. Uso do instrumento TDR para determinação do teor de água em diferentes camadas de um Latossolo Roxo distrófico. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v. 3, p. 417-420, 1999.

SIQUEIRA, G. M. **Variabilidade de atributos físicos do solo determinados por métodos diversos**. 2006. 163f. Dissertação (Mestrado em Agricultura Tropical e Subtropical) – Instituto Agrônomo, Campinas, 2006.

SOUZA, E.S. **Caracterização Hidrodinâmica na Escala Local e da Parcela Agrícola de Dois Solos do Estado da Paraíba: Variabilidade Espacial e Temporal, e Meio Homogêneo Equivalente**. Tese (Doutorado em Aplicação de Radioisótopos e Física dos Solos) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE, 2005.

SOUZA, C.F.; MATSURA, E.E.; FOLEGATTI, M.V.; COELHO, E.F.; OR, D. Sondas de TDR para a estimativa da umidade e da condutividade elétrica do solo. **Irriga**, v.11, n.1, p.12-25, 2006.

SOUZA, R.M.S. **Dinâmica de Energia, Água e Carbono em Área de Pastagem no Semiárido Pernambucano**. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, UAST, Serra Talhada, PE, 2014.

TEIXEIRA, C.F.A.; MORAES, S.O.; SIMONETE, M.A. Desempenho do tensiômetro, TDR e sondas de nêutrons na determinação da umidade e condutividade hidráulica do solo. **R. Brasileira de Ciências do Solo**, v. 29, p. 161-168, 2005.

TOMMASELLI, J. T. G.; BACHI, O. O. S. Calibração de um equipamento de TDR para medida de umidade de solos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.36, n.9, p.1145-1154, 2001.

TOPP, G. C.; DAVIS, J. L.; ANNAN, A. P. Electromagnetic determination of soil water content: measurement in coaxial transmission lines. **Water Resources Research**. Washington, v. 16, p. 574 – 582, 1980.

TRINTINALHA, M.A. **Avaliação da técnica da Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR) na determinação da umidade em um Nitossolo Vermelho eutroférico**. Maringá. 2000. 64 p. (Mestrado) - Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2000.

VIELMO, A.L. **Limite superior da retenção da água no solo: método de campo e método de estimativa**. 2008. 81f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria

VILLWOCK, R.; TAVARES, M.H.F.; VILAS BOAS, M.A. Calibração de um equipamento TDR em condições de campo. **Irriga**, v. 9, n. 1, p. 82-88, 2004.

APÊNDICE**Tabela 6 - Tempos de resposta (t) do sensor para as diferentes inserções das hastes (cm), obtidos no experimento 1.**

Comprimento (cm)	t (μ s)
0	14,94
1	18,57
2	21,99
3	24,34
4	26,2
5	28
6	29,28
7	30,16
8	31,18
9	31,85
10	32,35
11	32,65
12	33,01
13	33,53
14	33,91
15	34
16	34,26

17	34,50
18	35,08
19	35,59
20	36,39
21	37,88
22	38,16
23	39,02
24	39,66
25	39,89
26	40,98
27	41,24
28	41,80
29	42,58
30	43,58

Fonte: O AUTOR(2015).

Tabela 7 - Tempos de resposta (t) do sensor para diferentes lâminas de água, obtidos no experimento 2.

Profundidade(cm)	Lâmina(cm)	t (μ s)
1	2	36,55
2	4	40,52
3	6	42,21
4	8	42,29
5	10	42,54
6	12	42,74
7	14	42,88
8	16	42,89
9	18	42,99

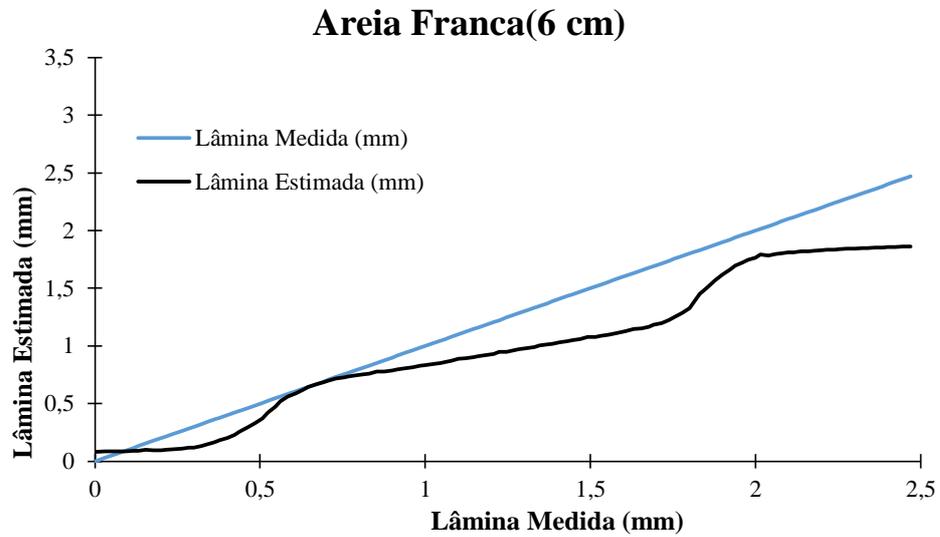
Fonte: O AUTOR(2015).

Tabela 8 – Tempos de resposta (t) do sensor para seus respectivos níveis de água, obtidos no experimento 3.

Nível de Água (cm)	t (μ s)
9	33,77
9,5	38,33
10	40,91
10,5	41,6
11	42,16
11,5	42,5
12	42,69
12,5	42,81
13	42,89
13,5	42,95
14	42,98
14,5	43,02
15	43,04
15,5	43,06
16	43,08
16,5	43,09
17	43,1
17,5	43,11
18	43,11

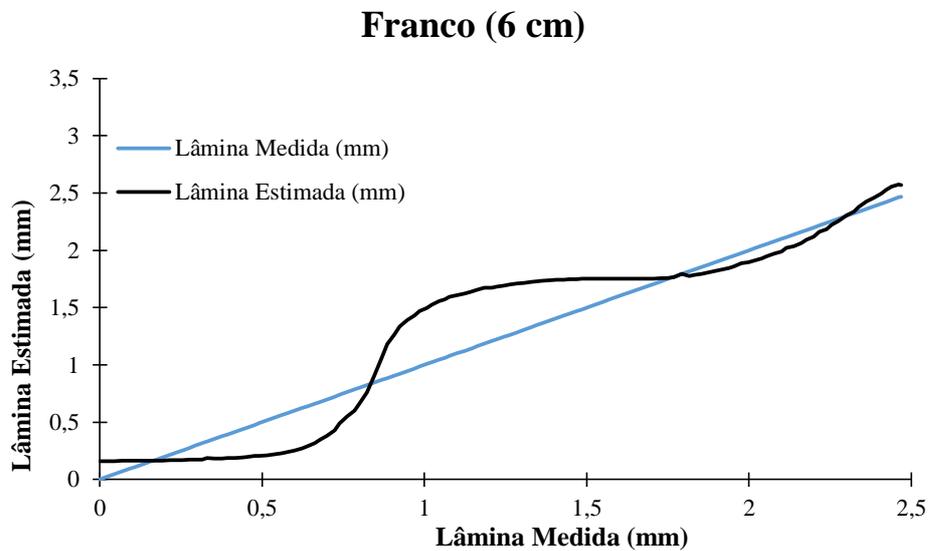
Fonte: O AUTOR(2015).

Figura 32 – Lâminas estimadas em função das lâminas medidas no experimentos com 6 cm de espessura de solo tipo Areia Franca.



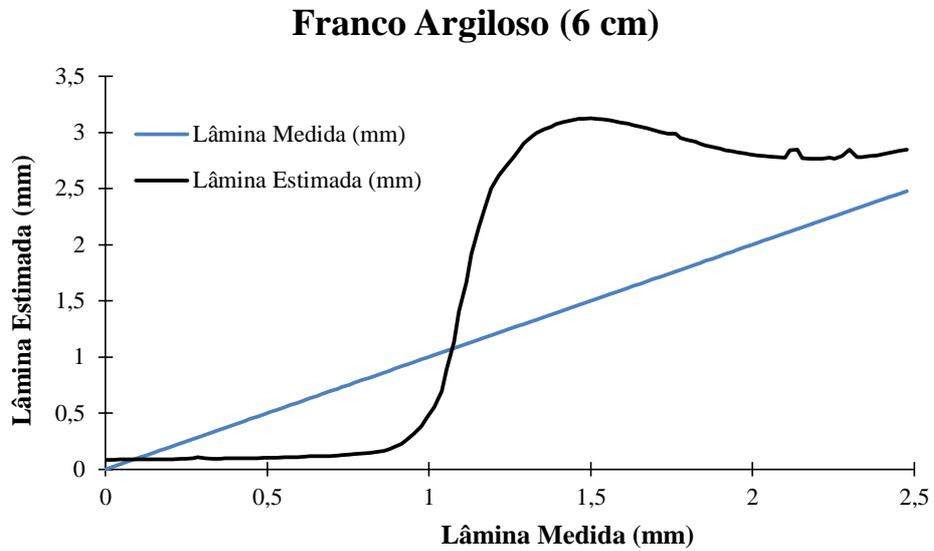
Fonte: O AUTOR(2015)

Figura 33 – Lâminas estimadas em função das lâminas medidas no experimentos com 6 cm de espessura de solo tipo Franco.



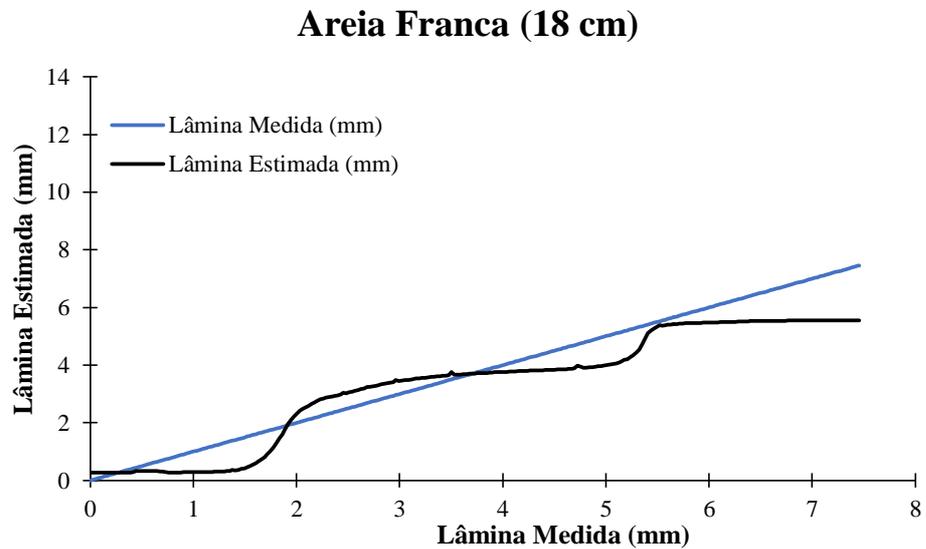
Fonte: O AUTOR(2015)

Figura 34 – Lâminas estimadas em função das lâminas medidas no experimentos com 6 cm de espessura de solo tipo Franco Argiloso.



Fonte: O AUTOR(2015)

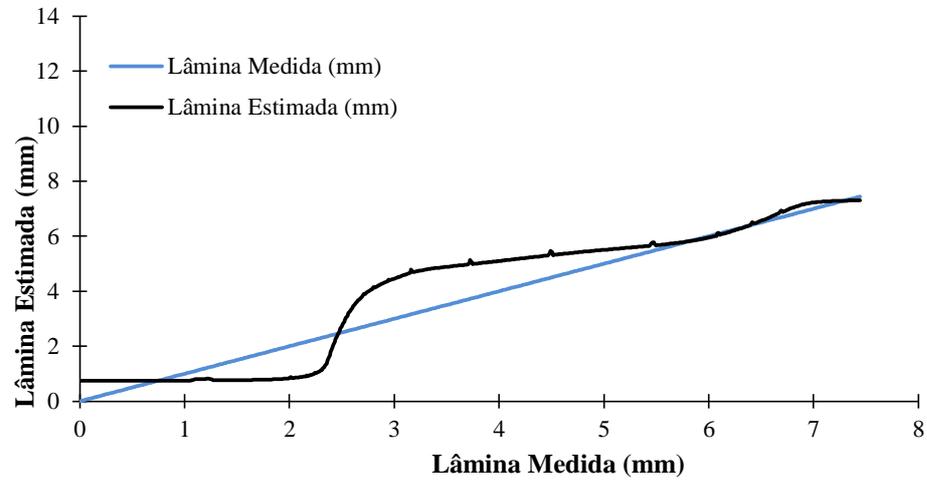
Figura 35 – Lâminas estimadas em função das lâminas medidas no experimentos com 18 cm de espessura de solo tipo Areia Franca.



Fonte: O AUTOR(2015)

Figura 36 - Lâminas estimadas em função das lâminas medidas no experimentos com 18 cm de espessura solo tipo Franco.

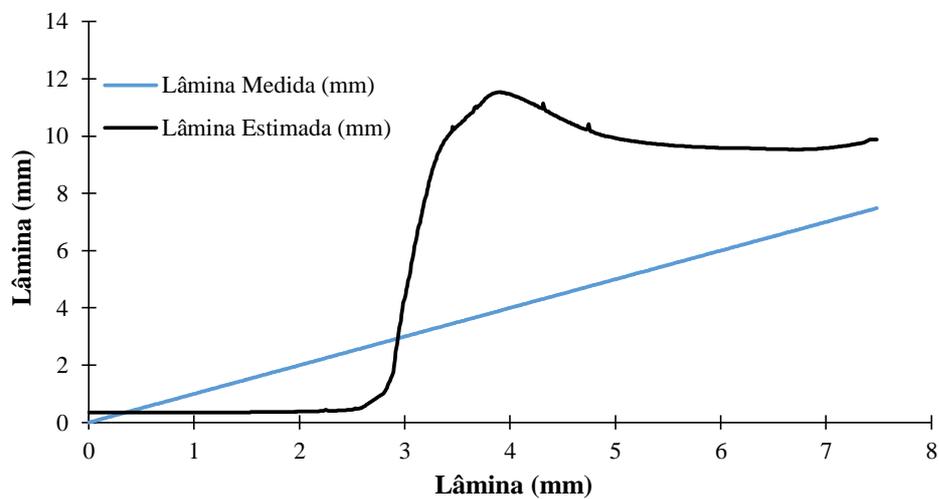
Franco (18 cm)



Fonte: O AUTOR(2015)

Figura 37 - Lâminas estimadas em função das lâminas medidas no experimento com 18 cm de espessura de solo tipo Franco Argiloso.

Franco Argiloso (18 cm)



Fonte: O AUTOR(2015)