



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA**  
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
**CURSO DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**  
CAMPUS II - CAMPINA GRANDE

VARIABILIDADE DA CONSTANTE DIELÉTRICA DO SOLO  
EM FUNÇÃO DE SUA UMIDADE E CLASSE

Irênio Amaro da Silva

CAMPINA GRANDE

2003

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA**  
**PROGRAMA DE PÓS - GRADUAÇÃO**  
**EM**  
**ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**VARIABILIDADE DA CONSTANTE DIELETRICA DO SOLO**  
**EM FUNÇÃO DE SUA UMIDADE E CLASSE**

*Irênio Amaro da Silva*

Orientadores:

Prof. Dr. Wilson Conciani

Prof. Dr. Raimundo Leidimar Bezerra

Campina Grande / PB

Outubro / 2003

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA**  
**PROGRAMA DE PÓS – GRADUAÇÃO**  
**EM**  
**ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**VARIABILIDADE DA CONSTANTE DIELETRICA DO SOLO**  
**EM FUNÇÃO DE SUA UMIDADE E CLASSE**

*Dissertação apresentada ao Centro de  
Ciências e Tecnologia, da Universidade  
Federal de Campina Grande – PB, para  
obtenção de título de mestre em Engenharia  
Civil*



S586v Silva, Irenio Amaro da  
Variabilidade da constante dieletrica do solo em funcao  
de sua umidade e classe / Irenio Amaro da Silva. - Campina  
Grande, 2003.  
68 f.

Dissertacao (Mestrado em Engenharia Civil) -  
Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciencias  
e Tecnologia.

1. Umidade do Solo 2. TDR 3. Calibracao 4.  
Instrumentacao 5. Solo Nao Saturado 6. Dissertacao I.  
Conciani, Wilson II. Bezerra, Raimundo Leidimar III.  
Universidade Federal de Campina Grande - Campina Grande  
(PB) IV. Título

CDU 624.13(043)

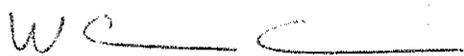
UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE

VARIABILIDADE DA CONSTANTE DIELÉTRICA DO SOLO  
EM FUNÇÃO DE SUA UMIDADE E CLASSE

Irênio Amaro da Silva

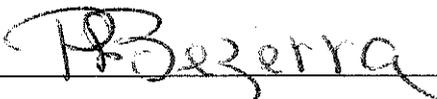
Dissertação submetida ao programa de pós – graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Dissertação aprovada por:



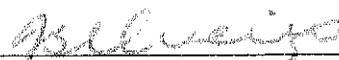
Prof. Dr. Wilson Conciani

Orientador



Prof. Dr. Reimundo Leidimar Bezerra

Orientador



Prof. Dr. João Batista Queiroz de Carvalho



Prof. Dr. Erinaldo Hilário Cavalcante

Campina Grande / PB  
Outubro de 2003

## *DEDICATÓRIA*

A minha esposa Maria José e aos meus filhos Laise e Leandro pelo amor, compreensão e apoio, aos meus pais Egídio e Bernarda (in memoriam), pelo amor, oportunidade e dedicação e aos meus irmãos Justo (in memoriam), Maria Amélia, Ana Copertina, Benedito Marinho, Cezário, Maria Luzia, Helena pelo exemplo de luta e dedicação à vida.

Ao povo da minha Terra Natal:  
Vila Bela da Santíssima Trindade MT

## AGRADECIMENTOS

*À Deus pelo meu existir e a Jesus Cristo  
Caminho Verdade e Vida*

*À minha mãe, minha primeira mestra,  
alfabetizou-me em casa. Mulher determinada,  
corajosa, sua prioridade foi a educação dos  
filhos Ensinou-me a transformar sonhos em  
realidade.*

*À Professora Cirila Francisca da Silva,  
minha Professora do curso primário. Educadora  
que foi exemplo no seu tempo, transformando a  
sala de sua casa na primeira sala da Escola de  
Pontes e Lacerda.*

*Ao meu tio João Pedro de Brito, que me  
acolheu na sua casa em Cuiabá, possibilitando a  
continuidade dos meus estudos no curso ginásial.*

*À Professora Glacildes Dantas,  
educadora determinada, a quem devo toda a  
preparação para os exames de acesso ao curso  
ginásial.*

*À Célia Ferreira Fortes, colega e amiga  
confidente, sempre fiel à nossa amizade. Ensinou-  
me a arte da alegria de viver.*

*À Professora Édna Maria de Albuquerque  
Affi, mulher forte, sensível, educadora, investiu  
na educação de muitos jovens, a quem devo a  
conclusão do curso ginásial.*

*Ao Professor Coronel Octayde Jorge da  
Silva, homem de carácter, crítico, educador  
preparado e amigo conselheiro, a quem devo a  
conclusão do 2º Grau e a oportunidade de*

*conviver e trabalhar na Escola Técnica Federal de Mato Grosso, atualmente CEFET-MT.*

*Ao Professor Doutor Wilson Conciani, ex aluno do curso de edificações, companheiro de trabalho em obras da construção civil em Cuiabá. Educador exigente, Crítico, conselheiro e amigo de todas as horas. Meu orientador que me ensinou a dar os primeiros passos no complexo ramo da ciência dos solos. Contribuiu na realização deste trabalho e acrescentou novas informações no meu aprendizado.*

*À Professora Simone Raquel Caldeira Moreira da Silva, colega, amiga de todas as horas, pesquisadora dedicada, a quem devo as orientações necessárias na utilização dos materiais e equipamentos no laboratório de solos do CEFET-MT.*

*A todos os funcionários administrativos e professores que contribuíram com a minha formação nesta instituição de ensino. A minha consideração e respeito à amiga e Professora Viturina, pela dedicação aos estudos e aos seus alunos.*

*Ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Mato Grosso, que apoiou este trabalho. Nesta instituição de ensino, eu tenho que agradecer o apoio, incentivo, participação e compreensão de muitas pessoas, em especial ao Diretor Geral Henrique do Carmo Barros, ao gerentes de cursos: José Luiz Malheiros e José Bispo Barbosa, aos Professores Marcos Vinicius, Ilda Helena.*

*À EMBRAPA – CNPDIA de São Carlos que liberou, aos cuidados do Prf. Dr. Wilson*

*Conciani, do CEFET-MT, o equipamento de TDR  
para medidas e levantamento de dados de  
amostras de solos em laboratório.*

*Ao Dr Herrmann da EMBRAPA –  
CNPDIA pelo apoio e orientação no uso do  
instrumento de TDR.*

*Ao Professor Gilmarcos pela orientação  
de informática, em especial, pela sua dedicação e  
paciência.*

*Aos colegas, professores Farto e Antônio Cezar  
pelo censo de humor nos instantes de  
descontração, seriedade e dedicação nos  
instantes de estudos e trabalhos. A Nádia e  
Rosana pelo apoio, dedicação e pela  
cordialidade no ambiente de trabalho.*

*À minha esposa, Maria José Nascimento  
da Silva, que tanto me incentivou a realizar o  
curso de mestrado.*

*Pelos filhos Laise e Leandro, pelo apoio e  
compreensão.*

*A todos os meus familiares, amigos e  
colegas que oraram, incentivaram e me ajudaram  
a realizar e concluir este trabalho.*

## ÍNDICE DO TEXTO

CAPÍTULO I.....PRINCIPAIS MÉTODOS PARA	
MEDIDA DE UMIDADE DO SOLO .....	01
1.1 – GENERALIDADES .....	01
1.2 – OBJETIVOS .....	02
CAPÍTULO II – A TÉCNICA DA REFLECTOMETRIA NO DOMÍNIO DO	
TEMPO (TDR) .....	04
2.1 – GENERALIDADES .....	04
2.2 – SONDA PARA EQUIPAMENTO DE TDR .....	05
2.3 – FATORES QUE AFETAM A MEDIDA DA CONSTANTE DIELÉTRICA .....	10
2.4 – A EQUAÇÃO DE TOPP ET AL (1980) .....	11
CAPÍTULO III – MATERIAIS E MÉTODOS PARA MEDIR UMIDADE DO	
SOLO COM TDR .....	16
3.1 – SOLOS EMPREGADOS NO ESTUDO .....	16
3.1.1 – SOLO DE CUIABÁ – ATERRO SANITÁRIO .....	17
3.1.2 – SOLO POLUÍDO DO ATERRO SANITÁRIO .....	18
3.1.3 – SOLO DE CUIABÁ – AREIA DE GOMA .....	18
3.1.4 – SOLO DA CHAPADA DOS GUIMARÃES .....	19
3.1.5 – SOLO DE CAMPO NOVO DO PARECIS .....	20
3.1.6 – SOLO DE RONDONÓPOLIS .....	20
3.2 – EQUIPAMENTO DE TDR E OUTROS EQUIPAMENTOS EMPREGADOS ..	21
3.3 – PREPARAÇÃO DO SOLO: CALIBRAÇÃO .....	24
CAPÍTULO IV – RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	27
4.1 – ENSAIOS COM VARIAÇÃO DE UMIDADE .....	27
4.1.1 – SOLO DO ATERRO SANITÁRIO DE CUIABÁ .....	27
4.1.2 – SOLO DO ATERRO SANITÁRIO DE CUIABÁ (POLUÍDO COM CHORUME) .....	29

4.1.3 – SOLO DA CHAPADA DOS GUIMARÃES.....	31
4.1.4 – AREIA DE GOMA .....	33
4.1.5 – SOLO DE CAMPO NOVO DO PARECIS .....	35
4.1.6 – SOLO DE RONDONÓPOLIS .....	37
4.2 – RESULTADOS DOS ENSAIOS DAS AMOSTRAS DE SOLOS COM UMIDADE CONSTANTE .....	39
4.2.1 – SOLO DO ATERRO SANITÁRIO DE CUIABÁ .....	40
4.2.2 – SOLO DA CHAPADA DOS GUIMARÃES .....	41
4.2.3 – AREIA DE GOMA .....	43
4.2.4 – SOLO DE CAMPO NOVO DO PARECIS .....	45
4.2.5 – SOLO DE RONDONÓPOLIS .....	46
4.3 – CONSTANTE DIELÉTRICA X UMIDADE VOLUMÉTRICA, ENSAIO COM VARIAÇÃO DE UMIDADE .....	47
4.4 – CONSTANTE DIELÉTRICA X PESO ESPECÍFICO SECO PARA OS ENSAIOS COM UMIDADE CONSTANTE .....	52
4.5 – INFLUÊNCIA DA POLUIÇÃO DO SOLO NA CONSTANTE DIELÉTRICA	56
4.6 – EQUAÇÃO PARA DETERMINAR A UMIDADE DO SOLO A PARTIR DA CONSTANTE DIELÉTRICA .....	57
4.7 – ESTUDOS DAS EQUAÇÕES PROPOSTAS PARA DETERMINAR O UMIDADE VOLUMÉTRICA EM FUNÇÃO DA CONSTANTE DIELÉTRICA DO SOLO .....	60
CAPÍTULO V – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....	64
5.1 – CONCLUSÕES .....	64
5.2 – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	65
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	67
ANEXOS .....	69

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 – Geometria do campo eletromagnético em torno das hastes de sondas TDR .....	06
FIGURA 2.2 – Arranjo esquemático de uma sonda de 4 hastes. ....	06
FIGURA 2.3 – Arranjo esquemático de uma sonda segmentada. ....	08
FIGURA 2.4 – Arranjo esquemático de uma sonda segmentada e o sinal característico produzido. ....	08
FIGURA 3.1 – Vista geral do aterro sanitário de Cuiabá, MT .....	17
FIGURA 3.2 – Testador de cabos empregado neste estudo. ....	22
FIGURA 3.3 – Célula coaxial empregada neste trabalho. ....	23
FIGURA 4.1 – Correlação entre $\theta$ e $\epsilon$ para o solo do aterro sanitário de Cuiabá .....	29
FIGURA 4.2 – Correlação entre $\omega$ e $\epsilon$ para o solo do aterro sanitário de Cuiabá .....	29
FIGURA 4.3 – Correlação entre $\theta$ e $\epsilon$ para o solo do aterro sanitário de Cuiabá (contaminado com chorume) .....	31
FIGURA 4.4 – Correlação entre $\epsilon$ e $\theta$ do solo da Chapada dos Guimarães .....	32
FIGURA 4.5 – Correlação entre $\omega$ e $\epsilon$ para o solo de Chapada dos Guimarães .....	33
FIGURA 4.6 – Correlação entre $\epsilon$ e $\theta$ da areia de goma .....	34
FIGURA 4.7 – Correlação entre $\omega$ e $\epsilon$ para a areia de goma .....	35
FIGURA 4.8 – Correlação entre $\epsilon$ e $\theta$ do solo de Campo Novo do Parecis .....	36
FIGURA 4.9 – Correlação entre $\omega$ e $\epsilon$ para o solo de Campo Novo do Parecis .....	37
FIGURA 4.10 – Correlação entre $\epsilon$ e $\theta$ do solo de Rondonópolis .....	38
FIGURA 4.11 – Correlação entre $\omega$ e $\epsilon$ para o solo de Rondonópolis .....	39
FIGURA 4.12 – Correlação entre $\epsilon$ e $\gamma_d$ do solo do aterro sanitário de Cuiabá .....	41
FIGURA 4.13 – Correlação entre $\epsilon$ e $\gamma_d$ do solo de Chapada dos Guimarães .....	42
FIGURA 4.14 – Correlação entre $\epsilon$ e $\gamma_d$ da areia de goma .....	44

FIGURA 4.15 – Correlação entre $\epsilon$ e $\gamma_d$ do solo de Campo Novo do Parecis .....	46
FIGURA 4.16 – Correlação entre $\epsilon$ e $\gamma_d$ do solo de Rondonópolis .....	47
FIGURA 4.17 – Comparação entre as curvas de calibração dos solos estudados .....	50
FIGURA 4.18 – Curvas de calibração dos solos estudados comparados com a curva de TOPP <i>et al.</i> (1980) .....	53
FIGURA 4.19 – Comparação entre a constante dielétrica ( $\epsilon$ ) e peso específico do solo seco ( $\gamma_d$ ) mantendo constante a umidade do solo .....	54
FIGURA 4.20 – Comparação entre a Constante Dielétrica ( $\epsilon$ ) e a Umidade Volumétrica ( $\theta$ ) do solo natural e do solo poluído com chorume do Aterro Sanitário de Cuiabá .....	57
FIGURA 4.21 – Ajuste dos pontos referentes aos solos (Litossolo; Podzólico Vermelho Amarelo; Latossolo Vermelho Amarelo) .....	58
FIGURA 4.22 – Comparação das curvas de calibração obtidas com a curva de TOPP <i>et al.</i> (1980) .....	59

## LISTA DE TABELAS

TABELA 3.1 – Caracterização física dos solos estudados .....	22
TABELA 4.1 – Resultados dos ensaios da amostra de Solo Natural do Aterro Sanitário .....	28
TABELA 4.2 – Resultados dos ensaios da amostra de Solo do Aterro Sanitário poluído com chorume .....	30
TABELA 4.3 – Resultados dos ensaios da amostra de Solo da Chapada dos Guimarães .....	31
TABELA 4.4 – Resultados dos ensaios da amostra da Areia de Goma .....	34
TABELA 4.5 – Resultados dos ensaios da amostra de Solo de Campo Novo do Parecis .....	35
TABELA 4.6 – Resultados dos ensaios da amostra de Solo de Rondonópolis .....	37
TABELA 4.7 – Solo Natural do Aterro Sanitário .....	39
TABELA 4.8 – Resultados dos ensaios da amostra de Solo da Chapada dos Guimarães .....	42
TABELA 4.9 – Resultados dos ensaios da amostra da Areia de Goma .....	43
TABELA 4.10 – Resultados dos ensaios da amostra de Solo de Campo Novo do Parecis .....	45
TABELA 4.11 – Resultados dos ensaios da amostra de Solo de Rondonópolis .....	46
TABELA 4.12 – Equações de calibração obtidas com os 05 tipos de solos do estado de Mato Grosso .....	48
TABELA 4.13 – Coeficientes de equação 4.2 para calcular o teor de umidade volumétrica dos solos .....	60
TABELA 4.14 – Comparação dos valores $d\theta$ obtidos por medição direta e pela utilização da equação 4.2 .....	63

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

CEFETMT - Centro Federal de Educação Tecnológica de Mato Grosso

CTC - Capacidade de troca catiônica

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

EUA - Estados Unidos da América

FEMA - Fundação Estadual do Meio Ambiente

SEPLAN - Secretaria de Planejamento

TDR - (Time Domain Reflectometry) – Reflectometria no Domínio do Tempo

UFMT - Universidade Federal de Mato Grosso

## LISTA DE SÍMBOLOS

C	.....	velocidade da luz ( $3 \times 10^8$ m/s)
d	.....	diâmetro das hastes
e	.....	Índice de vazios
$I_p$	.....	Índice de plasticidade
$k'$	.....	constante dielétrica relativa do material ( $\epsilon' / \epsilon_0$ )
$k''$	.....	fator de perda relativa
$k^*$	.....	constante dielétrica relativa complexa
$k'_m$	.....	permeabilidade relativa do material ( $\mu' / \mu_0$ )
L	.....	comprimento da sonda
s	.....	espaçamento das hastes
$S_{TDR}$	.....	comprimento virtual da sonda medido com o testador de cabos
t	.....	tempo gasto para o sinal percorrer a sonda
$V_p$	.....	velocidade de propagação do sinal eletromagnético no meio
W	.....	frequência angular
$w_L$	.....	Limite de liquidez
$w_p$	.....	Limite de plasticidade
Z	.....	impedância
$\epsilon$	.....	constante dielétrica
$\epsilon'$	.....	constante dielétrica do material
$\epsilon''$	.....	fator de perda
$\epsilon_0$	.....	constante dielétrica do vácuo ( $8,854 \times 10^{-12}$ farad / m)
$\gamma_d$	.....	Peso específico do solo seco
$\gamma_s$	.....	Peso específico da fração sólida

- $\Theta$  .....umidade volumétrica
- $\theta_{ca}$  .....umidade volumétrica calculada
- $\theta_{me}$  .....umidade volumétrica medida
- $\Delta\theta$  .....variação do teor de umidade (medida e calculada)
- $\mu'$  permeabilidade relativa do material
- $\mu_0$  .....permeabilidade do vácuo (  $1,257 \times 10^{-6}$  henry / m)
- $\text{tg}\delta$  .....tangente de perda ( $\epsilon''/\epsilon = k''/k'$ )

## RESUMO

O objetivo deste trabalho foi correlacionar dados experimentais de umidade do solo e constante dielétrica de forma a produzir equações que possam ser aplicadas na estimativa de umidade do solo. Neste trabalho apresentam-se dados experimentais e avaliação sobre a determinação do teor de umidade de solos por meio de transmissão e recepção de sinal de microondas. Para isto utilizou-se a técnica de TDR (Reflectometria no Domínio do Tempo). Empregou-se um testador de cabos que gera ondas eletromagnéticas na frequência de 1,2 MHz. Este equipamento permite medir a constante dielétrica do solo a qual pode ser correlacionado com teor de umidade. Sobre esta correlação existem diversas idéias. Há aqueles autores que recomendam uma equação “universal” para correlacionar constante dielétrica com a umidade. Outros que recomendam que cada solo tenha sua própria correlação. Estas correlações são calibradas para cada caso por ajuste estatístico de curvas aos pontos experimentais. Os ensaios e medidas foram realizados no laboratório. Nos experimentos foram empregadas amostras de solos de cinco classes diferentes: Litossolo, Podzólico Vermelho – Amarelo, Areia quartzosa, Latossolo Vermelho Escuro e Latossolo Vermelho Amarelo. Com os dados obtidos nos ensaios de cada tipo de solo, correlacionou-se o teor de umidade volumétrica do solo com a constante dielétrica determinada com o equipamento de TDR. Comparou-se as curvas ajustadas para os vários tipos de solos com a curva de Topp. São propostas novas equações para determinar o teor de umidade volumétrica em função da constante dielétrica, levando-se em conta o tipo de solo.

Palavras chaves – TDR; calibração; umidade do solo.

## ABSTRACT

The purpose of this work is to correlate dielectric constant and soil moisture experimental data in way to produce equations that can be applied on soil moisture estimation. On this work it is presented experimental data and evaluation on soils moisture determination by means of transmittion and reception of micro wave signal. For this, it was utilized a TDR technique (Time Domain Reflectometry). It was applied a cable tester that generates eletromagnetic waves in the frequency of 1.2 Mhz. This equipment allows to measure the dielectric constant of soil that can be correlated with its soil moisture. About this correlation there are several ideas. There are those authors that recomend a "universal" equation to correlate dielectric constant with moisture. Others those recomend that every soil have their own correlation. These correlations are calibrated to each case by statistical to experimental data. The test and measuments were corred out on laboratory. The experiments were applied to five diffent soils. Litossolo, Podzólico Vermelho – Amarelo, Arei quartzosa, Latossolo Vermelho Escuro e Latossolo Vermelho Amarelo. With data obtained on test of each kind of volumetric soil moisture and dieletric constant determined with TDR equipppment were correlated. The fited curves to several soil were compared to Topp curve. New curves are proposed to determine the volumetric soil moisture as wellas the function of dieletric constant, taking in account the kind of soil.

Key words – TDR; calibration; soil moisture.

# CAPITULO I

## INTRODUÇÃO

### 1.1 – Generalidades

A necessidade de conhecer o comportamento e as propriedades dos solos, em particular dos solos não saturados, quando são submetidos à variação no seu teor de umidade, têm exigido dos pesquisadores estudos e investimentos em pesquisas. Obter informações adequadas sobre o teor de umidade de um solo, para diferentes aplicações técnicas e científicas é muito importante para os profissionais que estudam o comportamento e as propriedades físicas, químicas e biológicas do solo.

O processo convencional, utilizado para medir o teor de umidade do solo, além da mobilização de equipamentos, exige acomodação adequada, transporte e posterior secagem em estufa. Este método, além da desvantagem de retirar a amostra do local, utiliza manipulação excessiva da amostra. Esta manipulação provoca, na maioria das vezes, alterações consideráveis nas amostras que podem mascarar os resultados obtidos. Uma outra opção à técnica convencional é o emprego de sondas de nêutrons. Mas esta técnica tem custo elevado e exige treinamento especial, porque manipula fontes radioativas perigosas à saúde, ficando submetidas ao controle de órgãos governamentais.

Essas técnicas, tanto a de estufa como a de sonda de nêutrons, freqüentemente são questionadas quanto à sua praticidade. No caso da sonda de nêutrons, são dirigidas críticas principalmente ao processo de calibração da sonda utilizada em campo. Devido à constituição do solo, que não é homogênea, e às camadas, que são de naturezas diferentes, a sonda de nêutrons é afetada pela variação do peso específico e da porosidade do solo. Como é impraticável controlar a variação da porosidade do solo ao longo de um perfil, as medidas do teor de umidade feitas com emprego de sondas de nêutrons são questionáveis e freqüentemente são consideradas pouco acuradas.

A utilização de sondas de nêutrons para determinação de umidade do solo também é questionada por causar um certo grau de amolgamento no solo ao longo do tubo guia que é instalado no solo.

O estudo dos processos hidrodinâmicos apresenta muitas limitações ao emprego de métodos convencionais de determinação de umidade. O emprego de técnicas convencionais pode também levar a resultados imprecisos, não sendo adequado quando houver uma grande variação no teor de umidade do solo durante o processo de coleta das amostras. Fenômenos como evaporação, escoamento, umidade relativa do ar, frio ou calor (processos dinâmicos), durante os trabalhos de amostragem podem modificar os valores da umidade, mascarando os resultados.

Na atualidade, uma técnica muito interessante aos profissionais que estudam as propriedades do solo, é a Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR). Aplicando os fundamentos da tecnologia TDR, pode-se estimar com mais rapidez o teor de umidade de um solo. Esta tecnologia utiliza como variável principal a constante dielétrica. A técnica TDR tem a vantagem da umidade do solo poder ser medida diretamente no campo, onde o solo mantém todas as suas características, propriedades físicas, químicas e biológicas, podendo ser levado em conta, até mesmo os fatores climáticos.

Os primeiros pesquisadores a fazer uso desta técnica foram DAVIS & ANAN (1977), que estudavam um método para determinar a umidade do solo destinado à agricultura. TOPP *et al.* (1980) realizaram novos estudos analisando o comportamento de diversos tipos de solos. Em consequência, propuseram uma equação correlacionando a umidade do solo com a sua constante dielétrica.

## 1.2 – Objetivos

O objetivo deste trabalho é analisar a aplicação da técnica TDR para a medida de umidade de diversas classes de solos de modo a contribuir na formulação de equações de calibração.

Para tanto, os seguintes objetivos específicos foram estabelecidos:

- produzir curvas de calibração para obter o teor de umidade de solos através da constante dielétrica;
- verificar a variabilidade entre estas curvas de calibração;
- obter coeficientes matemáticos para expansão da aplicação da equação de calibração para solos de mesma classe;

- comparar a equação de calibração ajustada para os solos estudados com a equação de TOPP *et al.* (1980);
- estimar a constante dielétrica do solo do aterro sanitário de Cuiabá, poluído com chorume;
- verificar o comportamento do solo do aterro sanitário de Cuiabá, comparando a constante dielétrica do solo natural desse aterro com a constante dielétrica do solo poluído com chorume;
- comparar a equação de calibração ajustada com a equação de TOPP *et al.* (1980).

## CAPÍTULO II

### A TÉCNICA DA REFLECTOMETRIA NO DOMÍNIO DO TEMPO (TDR)

#### 2.1 – GENERALIDADES

A utilização do TDR para a medição do teor de umidade do solo teve origem na agricultura, quando os pesquisadores estudavam métodos mais eficientes e confiáveis para o controle da umidade do solo. Os pioneiros no uso dessa técnica foram DAVIS & ANAN (1977). Essa técnica despertou o interesse de outros pesquisadores em diferentes áreas, surgindo novas aplicações do TDR, como por exemplo: na agricultura, (TOPP *et al.* 1980); na área de geotecnia (KUJALA e RAVASCA, 1994); na área de telefonia (LARROSA *et al.* 1995); e na medida da concentração de sais presentes no solo.

A técnica de TDR mede a constante dielétrica através da propagação de uma onda eletromagnética, após percorrer uma sonda cravada no solo. A velocidade de propagação do sinal tem uma dependência com a constante dielétrica do meio. A água tem constante dielétrica em torno de 80 e o ar em torno de 1. Experiências realizadas com solo seco, mostraram que o valor da constante dielétrica varia entre 2,5 e 7. Pequenas variações de umidade, nos vários tipos de solos, produziram considerável variação da constante dielétrica.

A constante dielétrica do solo é função da umidade, da textura, da porosidade e, da salinidade. TOPP *et al.* (1980) estudaram diversos tipos de solos do Canadá e EUA. Eles concluíram que o teor de água é o fator determinante principal na constante dielétrica da massa do solo. Para esses pesquisadores, fatores tais como: temperatura, tipo de solo, densidade da amostra e teor de sal tiveram efeitos essencialmente insignificantes, na variação da constante dielétrica dos solos estudados por eles.

HERRMANN (1993), questiona a proposta de TOPP *et al.* (1980) e cita que as variações das propriedades dos solos só podem ser negligenciadas para alguns tipos de solos e em faixas de frequências bem definidas. Para HERRMANN (1993), a validade da equação de TOPP *et al.* (1980) parece estar condicionada a algumas famílias de solos.

KUJALA & RAVASCA (1994) também verificaram que a aplicação da equação de TOPP *et al.* (1980) produziu resultados divergentes para vários tipos de solos.

## 2.2 – SONDA PARA EQUIPAMENTO DE TDR

A geometria da sonda com duas hastes paralelas foi utilizada por TOPP *et al.* (1980) para estudar o teor de umidade de um perfil de solo. Este recurso ainda hoje é muito utilizado no equipamento de TDR. A desvantagem deste arranjo é que ele exige casadores de impedância e gera ruídos que prejudicam a qualidade do sinal.

ZEGELIN *et al.* (1989) propuseram a utilização de sonda multi-hastes com o objetivo de eliminar os problemas anteriormente citados. Em torno de uma haste central, são dispostas outras três ou quatro hastes. A aplicação deste tipo de sonda descarta a utilização de casadores de impedância, porque define melhor o campo de medida.

A proposta de ZEGELIN *et al.* (1989) autores baseou-se na forma do campo eletromagnético gerado em torno das hastes. O campo eletromagnético transversal em torno das sondas multi-hastes assemelha-se à do cabo coaxial. As sondas paralelas com duas hastes mostradas na Figura 2.1a, produzem campo excêntrico, amplo e irregular, geram medidas menos confiáveis. As Figuras 2.1b e 2.1c mostram a forma do campo eletromagnético transversal em torno de sondas TDR com diferentes geometrias de hastes

Nos casos com mais hastes, a forma do campo eletromagnético gerado tende a tornar-se uniforme, ou pelo menos, confina mais a onda quando o arranjo das hastes se aproxima da forma de um círculo.

Utilizando-se o arranjo multi -hastes, obtém-se uma configuração mais próxima a do cabo coaxial, do tipo que conduz o sinal do aparelho gerador até a sonda. Esta característica melhora as condições de medida e reduz os ruídos. Um arranjo de sonda de 4 hastes pode ser visto na Figura 2.2.

Em sondas lisas (que possuem diâmetro constante), o espaçamento deve ser constante para que não haja mudança de impedância. O valor da relação espaçamento entre hastes e o seu diâmetro ( $s/d$ ) empregado nas sondas, concentra-se em torno de 10. A impedância de uma sonda é assemelhada a uma linha de transmissão coaxial e é fornecida pela Equação 2.1.

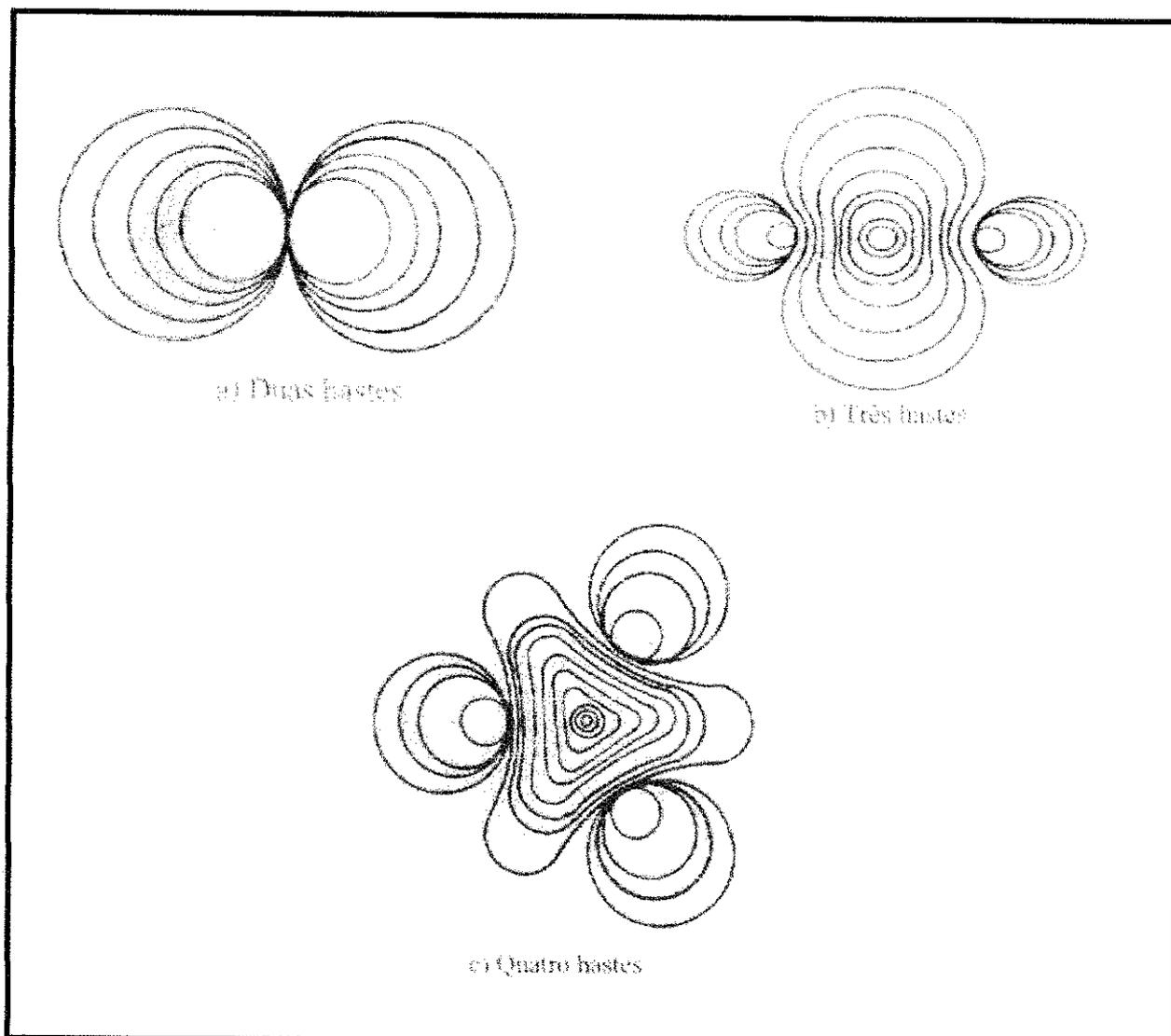


Figura 2.1: Geometria do campo eletromagnético em torno das hastas de sondas TDR.

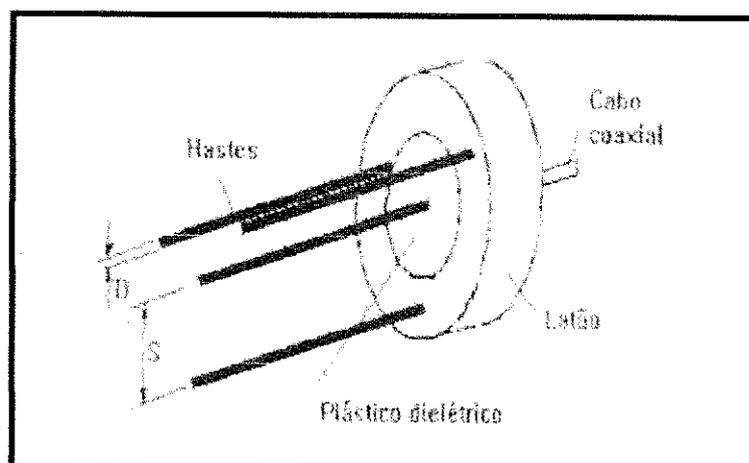


Figura 2.2: Arranjo esquemático de uma sonda de 4 hastas.

$$Z = \frac{60}{\sqrt{\epsilon}} \ln \frac{2s}{d} \quad (2.1)$$

onde:

Z = impedância;

s = espaçamento entre as hastes;

d = diâmetro das hastes;

$\epsilon$  = constante dielétrica.

Quando se realiza a medição do teor de umidade de um solo utilizando TDR, a região de medida fica limitada pelo comprimento da sonda. Por exemplo, uma sonda com 15 cm de comprimento, instalada na superfície de um terreno, fornecerá uma medida de umidade global dos primeiros 15 cm de perfil do solo. Este valor não representa uma medida do teor de umidade num ponto da camada ou do perfil de um solo, mas sim a média de uma região abrangida pela sonda. Quando há necessidade de se obter o teor de umidade em regiões previamente definidas, é preciso instalar a sonda exatamente nestas profundidades. Para superar esta dificuldade TOPP & DAVIS (1980) desenvolveram uma sonda paralela, de duas hastes, segmentadas.

As sondas segmentadas começaram a ser utilizadas na década de 80 quando TOPP & DAVIS (1985) precisavam estudar a umidade do solo de uma plantação de milho em diferentes profundidades. TOPP e seus parceiros criaram uma sonda que permitia, de uma única vez, medir a umidade em diferentes profundidades.

A sonda segmentada é construída intercalando-se trechos demarcadores de impedância em suas hastes. Os trechos demarcadores de impedância são regiões onde a impedância é maior que as demais. Esta alteração na impedância da sonda é alcançada com redução no diâmetro da haste. A Figura 2.3 ilustra este dispositivo.

O comprimento dos trechos é escolhido de maneira que fique determinado sua presença no sinal medido pelo equipamento de TDR. A Figura 2.4 mostra uma sonda segmentada e as mudanças de intensidade obtidas no sinal de resposta. A ordenada representa a amplitude do pulso que é refletido pelas hastes. A abcissa representa o tempo que o sinal leva para percorrer a sonda.

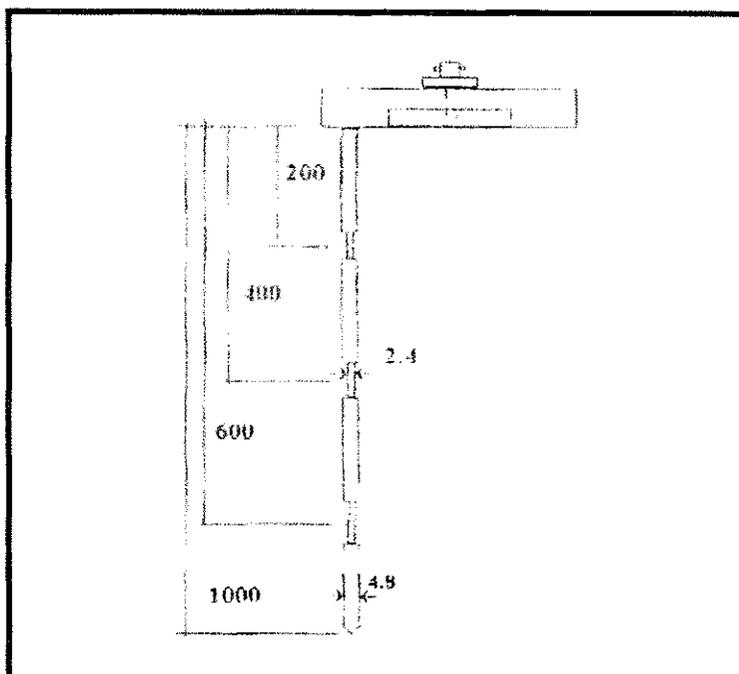


Figura 2.3: Arranjo esquemático de uma sonda segmentada.

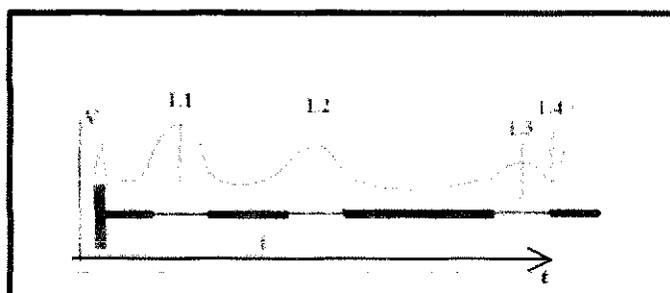


Figura 2.4: Arranjo esquemático de uma sonda segmentada e o sinal característico produzido.

As medidas do teor de umidade de um solo feitas com este novo tipo de sonda, quando comparadas a medidas efetuadas com sondas convencionais lisas, não mostraram diferenças significativas nos valores encontrados. Esta conclusão foi obtida por TOPP & DAVIS (1985), medindo a umidade na parede de uma trincheira, numa mesma profundidade, utilizando sondas lisas e sondas segmentadas. Também foi este o resultado comprovado por HERRMANN et al. (1996).

Empregando a técnica TDR, por meio de um testador de cabo, pode-se mensurar os seguintes parâmetros:

- ✓ tempo de propagação de uma onda eletromagnética (esta é função da constante dielétrica do meio no qual a onda se propaga);

- ✓ reflexão do sinal sobre uma impedância descasada;
- ✓ amplitude do sinal gerado pelo equipamento, tanto na ida como na volta da sonda.

A constante dielétrica pode ser calculada empregando-se uma equação que relaciona o seu valor ao tempo que o sinal leva para percorrer o meio, em função do comprimento da sonda utilizada. Isto é, levando-se em conta a distância percorrida pelo sinal, conforme Equação 2.2. O fator 2 presente no denominador da fórmula, leva em conta o percurso a ser realizado pelo sinal que faz o caminho de ida e de volta, portanto, 2 vezes o comprimento da haste.

$$\varepsilon = \left( \frac{ct}{2L} \right)^2 \quad (2.2)$$

Sendo:  $\varepsilon$  = constante dielétrica;

$c$  = velocidade da luz;

$t$  = tempo gasto para o sinal percorrer a sonda;

$L$  = comprimento da sonda.

Ondas eletromagnéticas, como, por exemplo, a luz visível, ondas de rádio, micro ondas e raio X, possuem um comportamento ondulatório, descrito pela primeira vez por James Clerk Maxwell. Esta foi, sem dúvida, sua contribuição para a unificação dos campos eletromagnéticos. MARIANO (2003).

Uma outra forma de calcular a constante dielétrica é utilizar um equipamento que forneça o comprimento virtual entre o início e o final de uma sonda percorrida por um sinal de características conhecidas. O equipamento utilizado para este caso é geralmente um testador de cabos, que emite e recebe o sinal eletromagnético com velocidade de propagação conhecida, convertendo o tempo decorrido no trajeto em um comprimento virtual. Neste caso, emprega-se a Equação 2.3 para o cálculo da constante dielétrica.

$$\varepsilon = \left( \frac{S_{TDR}}{V_p L} \right)^2 \quad (2.3)$$

Sendo:  $S_{TDR}$  = comprimento virtual da sonda medido com o testador de cabos;

$V_p$  = velocidade de propagação do sinal eletromagnético no meio.

Uma das grandes vantagens do TDR é a possibilidade de automação do processo de leituras. TORRE (1995), apud CONCIANI (1997), desenvolveu um sistema para aquisição e transferência de dados (por rádio e / ou telefone) aplicados a TDR.

### 2.3 – FATORES QUE AFETAM A MEDIÇÃO DA CONSTANTE DIELÉTRICA

Do ponto de vista eletromagnético, o solo é um material complexo e constituído por uma mistura variada, onde se destacam 4 composições dielétricas: o ar que apresenta valor de constante dielétrica igual a 1; O volume de solo, onde os grãos apresentam constante dielétrica variando entre 3 e 5, quando seco; a água no solo, que pode se apresentar sob forma de água adsorvida e sob forma de água livre no solo. A água apresenta valor de constante dielétrica em torno de 81.

Uma molécula de água ligada às partículas do solo interage com uma onda eletromagnética incidente de modo diferente das moléculas de água livre. Para SCHMUGGE (1983) apud HERRMANN et al (1996), o valor da constante dielétrica da água livre é elevado devido à facilidade com que suas moléculas alinham os momentos de seus dipolos quando submetidos a um campo eletromagnético (efeito de Maxwell-Wagner). Dessa forma, qualquer ação que impeça a rotação molecular livre da água, tais como frequências muito elevadas ou adsorção da água pela partícula de solo, provoca a diminuição da constante dielétrica da água. As constantes dielétricas na forma complexa de água livre e ligada são funções da frequência eletromagnética ( $f$ ), da temperatura física ( $T$ ) e da salinidade ( $S$ ).

De acordo com pesquisa apresentada por HALLIKAINEN et al. (1985), a constante dielétrica do solo misturado altera em função dos seguintes fatores:

- frequência, temperatura e salinidade;
- teor unidade volumétrica total,  $\theta_v$ ;
- fração relativa de água livre e ligada, a qual está relacionada à área de solo por unidade de volume;
- peso específico do solo;

- formato das partículas do solo;
- forma da absorção da água pelo solo.

As propriedades dielétricas do solo úmido são caracterizadas pela dependência da frequência como função da resposta da parte complexa  $\varepsilon(w)$  da constante dielétrica, em que:

$$\varepsilon(w) = \varepsilon_r(w) - j\varepsilon_i(w) \quad (2.4)$$

Onde:

$\varepsilon_r(w)$  é a parte real de  $\varepsilon(w)$ ;

$\varepsilon_i(w)$  é a parte imaginária de  $\varepsilon(w)$ ;

$j = \sqrt{-1}$ ;

$w$  é a frequência angular.

A parte real da função resposta dielétrica é uma medida da energia armazenada pelos dipolos alinhados por um campo eletromagnético aplicado. Quando a frequência é maior que Frequência de Relação ( $w_R$ ), os dipolos podem não acompanhar o campo e a capacidade do meio para armazenar energia do campo elétrico decai.

Experimentos conduzidos por RINALDI & FRANCISCA (1999) indicaram que a parte real da constante dielétrica pode sofrer variações de até seis vezes, dependendo da faixa de frequência escolhida. O experimento destes pesquisadores foi conduzido fazendo variar a frequência incidente em amostras de "loess".

De acordo com o que indicam os pesquisadores citados, estas variações se devem ao efeito de relaxação que ocorre quando se aumenta a frequência. Isto é, aumentando-se a frequência, haverá um momento em que os dipolos não poderão acompanhar a mudança do campo elétrico. Desta forma, o valor da constante dielétrica sofre uma redução.

## 2.4 – A EQUAÇÃO DE TOPP ET AL. (1980)

Para correlacionar a constante dielétrica com a umidade volumétrica, TOPP *et al.* (1980) utilizaram quatro tipos de solos com texturas diferentes e com características

variando de solo argiloso a solo arenoso, um solo orgânico e dois produtos artificiais, constituídos por minúsculas esferas de vidro com distribuições granulométricas diferentes.

Com o objetivo de assegurar um controle mais rigoroso, os materiais selecionados para a pesquisa foram colocados numa coluna apropriada, tomando-se o cuidado de proporcionar o mesmo índice de vazios. Nestas colunas foram utilizados: um dispositivo para controlar a entrada e a saída de água da coluna; bureta de precisão para medir a quantidade de água injetada e retirada da coluna; equipamento de TDR para medir a constante dielétrica de cada amostra a ser pesquisada. TOPP *et al.* (1980) verificaram, por meio dos resultados dos ensaios, que os pesos específicos das amostras variavam entre 10,4 e 16,1 kN / m<sup>3</sup>.

A experiência foi desenvolvida, medindo a constante dielétrica, quando cada amostra foi submetida à variação no seu teor de umidade, no processo de umedecimento e no processo de secagem. Com os dados levantados foram traçadas curvas de calibração relacionando a umidade volumétrica e a constante dielétrica medida com o TDR. De acordo com o relato desses pesquisadores, todas as curvas encontradas apresentaram formas idênticas e valores muito próximos. Como os materiais pesquisados tinham pesos específicos diferentes, os pesquisadores, após análise e discussão dos resultados, concluíram que essas propriedades exerciam pequenas influências na variação da constante dielétrica.

TOPP *et al.* (1980) tiveram o cuidado de comparar os seus resultados com os resultados obtidos por outros pesquisadores que utilizaram amostras de solos de regiões diferentes e utilizaram outros tipos de equipamentos. Em todas as curvas utilizadas na comparação, observaram-se comportamentos idênticos. Por causa destas comparações e análise dos resultados, TOPP *et al.* (1980) formularam a Equação 2.5, de caráter geral para diversos solos.

$$\Theta = - 5,30 + 2,92 \varepsilon - 0,055\varepsilon^2 + 0,00043 \varepsilon^3 \quad (2.5)$$

Sendo:

$\Theta$  = umidade volumétrica;

$\varepsilon$  = constante dielétrica do solo.

Nesta equação, TOPP *et al.* (1980) aplicaram os resultados obtidos com confiança de 95% e significância de 5%. Esta equação foi aceita como universal entre a maioria dos

usuários do TDR, para calcular o teor de umidade volumétrica do solo em função da constante dielétrica. Os equipamentos que medem a umidade do solo, empregando a tecnologia TDR, disponíveis no mercado internacional, empregam a equação de TOPP *et al.* (1980).

A utilização da Equação 2.5 como sendo uma equação universal, para o cálculo do teor de umidade de um solo, não permaneceu por muito tempo. Na década de 90 surgiram novas pesquisas e novos argumentos, em particular de pesquisadores brasileiros, questionando o uso da Equação 2.5 para qualquer tipo de solo, principalmente quando se trata de solos tropicais. Com o avanço das pesquisas, novos resultados foram sendo obtidos, o que possibilitou avaliar de maneira mais profunda a conclusão e a equação proposta por TOPP *et al.* (1980).

HERRMANN (1993), utilizando a técnica TDR, construiu curvas de calibração de três materiais diferentes. Na sua pesquisa foram utilizados: solo arenoso, solo argiloso e micro-esferas de vidro. Para obtenção dos dados para traçar a curva de calibração, cada solo utilizado na pesquisa foi subdividido em sub-amostras e colocadas em caixas cúbicas de acrílico, com 10 cm de aresta. Cada amostra foi cuidadosamente preparada para que mantivesse uma distribuição uniforme de massa. Individualmente, para cada tipo de solo, foi destacada uma sub-amostra para ser colocada em um teor de umidade, sendo deixada descansar numa câmara úmida por alguns dias para que a umidade se tornasse uniforme em toda amostra da cuba. Após esse período, foi medida a constante dielétrica de cada subgrupo de amostras de cada tipo de solo com o instrumento de TDR. Em seguida, foi determinado o teor de umidade das mesmas pelo método da estufa.

Para cada tipo de solo pesquisado por HERRMANN (1993) foi obtida uma curva de calibração diferente. Analisando e comparando os resultados, ele verificou que a equação encontrada era diferente da equação de TOPP *et al.* (1980). Aquele pesquisador atribuiu a diferença na equação, às diferenças na textura dos materiais estudados. Essa conclusão contraria a proposta de uma equação universal para relacionar a umidade volumétrica com a constante dielétrica para todo e qualquer tipo de solo.

O método utilizado por HERRMANN (1993) difere do empregado por TOPP *et al.* (1980) quanto a forma de variar o teor de umidade das amostras de solos para medida da constante dielétrica com TDR. TOPP *et al.* (1980) utilizaram uma caixa acrílica para colocar a amostra de solo. Esta foi submetida a uma variação de umidade, e, em seguida, foi medida a constante dielétrica da amostra sempre na mesma célula.

HERRMANN *et al.* (1996) estudaram o comportamento do solo de Campo Novo do Parecis – MT, utilizando a técnica TDR. Os resultados obtidos por eles nessa pesquisa, demonstraram uma correlação da constante dielétrica com o valor da umidade volumétrica, com um  $r = 0,997$ . Neste experimento foi programada uma variação no teor de umidade do solo na faixa de 0 a 60 %. Esses resultados também confirmaram um comportamento diferenciado em relação aos resultados de TOPP *et al.* (1980). A pesquisa com o solo de Campo Novo revelou ser relevante a textura e a porosidade existentes entre os materiais. Os resultados dessa pesquisa permitem discutir a influência da água ligada e água livre no solo.

A explicação para influência da textura na umidade do solo medida com instrumento que utiliza microondas, como é o caso do TDR, foi explicada e descrita por SHMUGGE (1983) apud HERRMANN *et al.* (1996). Para esse pesquisador, o valor da constante dielétrica da água é elevada devida à facilidade que têm suas moléculas de alinharem os seus dipolos quando submetidos à ação de um campo elétrico ou eletromagnético aplicado. Desta forma, qualquer influência externa que impeça a rotação molecular livre da água, tais como as frequências muito altas ou adsorção da água pela partícula do solo, provocará uma diminuição da constante dielétrica do solo. Daí, a razão de se utilizar na pesquisa do solo equipamentos que utilizam microondas na faixa de frequência de 1 Mhz a 10 Ghz.

A interação das partículas do solo com as moléculas d'água dependem fundamentalmente do tipo de solo. Quando o solo é arenoso e rico principalmente em quartzo, as interações das partículas do solo com as moléculas de água são muito pequenas.

Quando os solos são argilosos, as partículas apresentam quimicamente maiores atividades e promovem uma grande interação física com as moléculas da água. Portanto, nos solos com textura argilosa, é preciso empregar uma maior quantidade de água para que exista melhor interação com uma onda eletromagnética. Essa propriedade desse tipo de solo afeta a curva resultante da constante dielétrica com o teor de umidade volumétrica.

A preocupação com a calibração de medidas com o TDR vem crescendo a cada dia. Esta preocupação pode ser evidenciada nos trabalhos de RINALDI & FRANCISCA (1999) que buscam solução teórica para o equacionamento deste problema ou, de CICHOTA & VAN LIEN (2002) que têm uma abordagem mais pragmática. Estes dois últimos autores buscam calibrar o TDR no campo através de comparação com tensiômetros.

A comparação com tensiômetros é arriscada por fornecer um único ponto de confirmação da curva de calibração e por ser uma correlação secundária. Isto é, o resultado

da medida realizada com o tensiômetro é um valor de sucção que vai ser correlacionado com o teor de umidade através da curva característica de retenção de umidade do solo.

Assim sendo, permanece o dilema dos usuários do TDR: como confiar plenamente nos valores de umidade obtidos, ou ainda, qual a faixa de erros que seriam toleráveis, face às grandes vantagens de automação e não invasão do solo e manuseio de amostras?

A literatura informa que alguns autores têm utilizado a técnica de TDR para a medição simultânea da salinidade e conteúdo de água no solo (DALTON, 1984), medida de potencial matricial no solo (PHENE et al. , 1988).

Dentre as vantagens do uso da técnica de TDR, pode-se citar:

- alta exatidão na medida de conteúdo de água;
- não utiliza radiação ionizante;
- técnica não destrutiva;
- baixo custo no acoplamento a um coletor de dados;
- medições podem ser realizadas tanto no perfil horizontal como no perfil vertical do solo;
- medições de campos não causam distúrbios no solo;

Dentre as desvantagens, citam-se:

- a influência da salinidade nas medidas da umidade volumétrica;
- a influência dos óxidos de ferro no processo de leitura, através da permeabilidade característica da cada óxido;
- dependência do tipo de solo, isto é, a dependência das características de solos minerais e solos orgânicos na calibração;
- variações significativas da densidade global do solo, em particular em solos expansivos, provocam substancial mudança na leitura do conteúdo de água.

## **CAPÍTULO III**

### **MATERIAS E MÉTODOS PARA MEDIR UMIDADE DO SOLO COM TDR**

#### **3.1 – SOLOS EMPREGADOS NO ESTUDO**

O presente estudo contempla uma proposta de organizar um banco de dados com as informações técnicas e científicas dos solos das principais regiões do estado de Mato Grosso, dando prioridade às regiões onde os solos já apresentam problemas de erosão ou recalques e colapsos, que comprometem fundações de edifícios, pontes, caixas d'água, rodovias e regiões agrícolas. Esse banco de dados está disponível para pesquisas e uso da comunidade.

Neste trabalho foram utilizadas amostras de solos de cinco locais diferentes, coletadas em quatro municípios do Estado de Mato Grosso. As amostras não foram selecionadas ao acaso. Previamente estabeleceu-se uma diretriz para a realização deste trabalho, onde definiu-se: tipos de amostras a serem estudadas; locais onde seriam coletadas essas amostras; tipos de ensaios a serem realizados; e tipos de equipamentos que seriam necessários para realizar a pesquisa. As amostras de solos para calibrações foram selecionadas levando-se em conta os diferentes tipos de solos presentes no estado de Mato Grosso.

Os critérios para escolha dos locais onde essas amostras seriam coletadas foram: abrangência geográfica, representatividade das classes de solos (pedológica e geotécnica), importância social, econômica e ambiental da obra instalada no local; problemas de fundação na obra local e prevenção de futuros problemas ambientais.

No laboratório de solos do CEFETMT as amostras foram ensaiadas e analisadas visando o conhecimento da granulometria e os limites de Atterberg. Nas seções seguintes faz-se uma apresentação dos solos estudados.

### 3.1.1 – SOLO DE CUIABÁ – ATERRO SANITÁRIO

A amostra de solo da Área 1 foi coletada no município de Cuiabá, situado no centro geodésico da América Latina (nas coordenadas 15°35'56" latitude Sul, 56°06'01" longitude Oeste Gr, altitude 165 m). Quanto ao relevo, Cuiabá situa – se na Baixada Cuiabana (Depressão Paraguai – Pantanal), calha do Rio Cuiabá.

Na sua formação geológica, percebe-se testemunhos que indicam a origem do município na Faixa Móvel Brasileira, retrabalhada posteriormente. Coberturas dobradas do Proterozóico, Grupo Cuiabá. As rochas predominantes no Grupo Cuiabá são o filito e o meta-arenito.

O clima predominante é tropical quente e sub-úmido. A precipitação média anual é de cerca de 1750 mm, com intensidade máxima ocorrendo nos meses de dezembro, janeiro e fevereiro. A temperatura média anual é de 24° C, sendo a máxima 43° C e a menor mínima 0° C. Estas observações cobrem apenas os últimos cem anos.

A amostra da Área 1, foi solo do aterro sanitário de Cuiabá, no local de implantação da obra. O solo dessa região foi classificado como Litólico do tipo silto-argiloso, oriundos da intemperização de meta-arenitos. Amostras desse solo foram utilizadas na pesquisa devido à importância que a obra do aterro sanitário representa para o município de Cuiabá e pela necessidade de se obter mais informações técnicas e científicas sobre o impacto do aterro no solo da região onde foi implantado. A Figura 3.1 mostra a área onde as amostras foram coletadas.

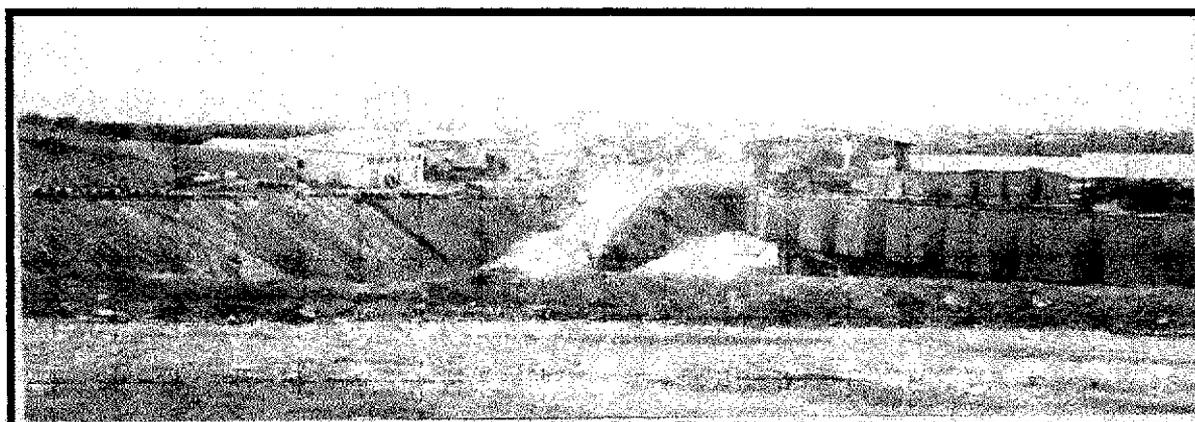


Figura 3.1: Vista geral do aterro sanitário de Cuiabá, MT.

Segundo FUTAI *et al.* (1998), o solo de Cuiabá apresenta alguns argilo-minerais do tipo 2:1. Isto é, as amostras analisadas por FUTAI *et al.* (1998) indicaram a presença de ílita e esmectitas. Estes argilo-minerais são bastante ativos e interferem no relacionamento água-sólidos. SANTOS (2003) estudou o comportamento dos solos de Cuiabá quando compactados e encontrou algumas anomalias no que se refere à relação teor de umidade x peso específico seco. Entretanto, em Cuiabá existem diversos tipos de saprolitos. Em geral, aqueles que são oriundos de meta-arenitos não apresentam estes argilo-minerais do tipo 2:1. Este é o caso do solo selecionado para este estudo.

### **3.1.2 – SOLO POLUÍDO DO ATERRO SANITÁRIO**

Com a finalidade de reunir mais informações para analisar o comportamento do aterro sanitário de Cuiabá, além das amostras de solo natural, foram colhidas amostras de solo poluído por chorume.

### **3.1.3 – SOLO DE CUIABÁ – AREIA DE GOMA**

Solo de Cuiabá, no bairro Coxipó, na área de exploração de areia de goma, onde há predominância de areia quartzosa. Constitui uma das áreas típicas da Baixada Cuiabana, onde predominam materiais inconsolidados silto-arenosos, popularmente denominados areia de goma, devido ao ligante natural (silte e argila) que lhe atribui qualidades para a composição de argamassa. Os solos desta área podem ser classificados como areias uniformes.

Nesta área localiza-se o Distrito Industrial de Cuiabá, onde hoje predomina a construção de armazéns de estocagem de grãos, algumas indústrias de pré – moldados de concreto, indústria de óleo vegetal, gás e outras indústrias, além de sítios e chácaras de lazer, com culturas permanentes (pomares) e temporárias de subsistência. Parte desta área é cortada pela BR 364, ao longo da qual encontram-se instalados postos de gasolina, clínicas, instalações comerciais e hotéis.

Nesta região, a exploração desordenada para retirada de matéria prima acelerou o desencadeamento de processos erosivos que comprometem as cabeceiras de drenagem, especialmente nas áreas de extração de areia de goma e promovem alterações topográficas que são evidenciadas pelas cavas abandonadas.

A baixa capacidade de carga dos solos dessa região constitui um problema para as fundações. Na ocupação industrial deve – se ainda considerar severas restrições quanto à poluição das águas. Toda essa região comunica-se direta ou indiretamente, por meio da bacia do rio Coxipó, com o rio Cuiabá, um dos alimentadores do pantanal e afluente principal do rio Paraguai.

#### **3.1.4. SOLO DA CHAPADA DOS GUIMARÃES**

A amostra de solo utilizada no estudo encontra-se no município de Chapada dos Guimarães, situado a 63 km de Cuiabá, (coordenada – 15° 17' 25" latitude Sul, 55° 48' 15" longitude Oeste Gr, altitude 793 m). O solo da Chapada dos Guimarães, onde foi coletada a amostra, está localizado na região de implantação da Reserva Nacional da Chapada dos Guimarães. O solo dessa região foi classificado como Podzólico vermelho – amarelo, distrófico, horizonte A moderado, areno-argiloso.

O clima da região é classificado como tropical quente e sub-úmido, com precipitação média anual de 1500 mm, com intensidade nos meses de dezembro, janeiro e fevereiro. A temperatura média anual é igual a 24° C com máxima de 40° C e mínima de 0° C.

A região da Chapada dos Guimarães está assente sobre o Planalto dos Guimarães. A litologia deste planalto vai desde o Pré – Cambiano até o Cenozóico. É constituído ora por relevo de cuevas e chapadas, ora por relevos planos convexos e residuais, ora por complexos tectônicos, de escarpas alcantiladas, com reversos de rampas indefinidas e interrompidas por relevos residuais de topo plano.

A rocha predominante no município de Chapada dos Guimarães é o arenito. Nas partes mais baixas, onde ocorre o contato com o Grupo Cuiabá, podem surgir filitos e meta-arenitos. O arenito sofre alteração intensa e remoção do material formado com rapidez devido ao relevo acidentado do parque.

### 3.1.5 SOLO DE CAMPO NOVO DO PARECIS

O solo estudado encontra-se na cidade de Campo Novo do Parecis, no local onde foi implantado o campo experimental de solos e fundações. Este campo experimental está localizado ao lado do “canteiro de obras” da prefeitura municipal. O solo dessa região é o Latossolo Vermelho Escuro do tipo silte-argiloso.

Campo Novo do Parecis, está localizada a 400 km a Noroeste de Cuiabá, (latitude 15°39'51" latitude Sul, longitude 57°53'11" longitude Oeste Gr, altitude de 570 m). O clima dessa região (Centro – Norte) é Equatorial quente e úmido, com 3 meses de seca, de maio a agosto. A precipitação média anual de 1750 mm. As chuvas se concentram no período de novembro a abril, com intensidades máximas em janeiro, fevereiro e março. Nos meses seguintes chove muito pouco, ou não há chuva. A temperatura média anual é de 24° C, com máxima de 36° C e mínima de 0° C. Em relação ao relevo, está assentado sobre a Chapada dos Parecis. Geologicamente, a região faz parte da Formação Parecis, coberturas não dobradas de Fanerozóico. Na Chapada dos Parecis predominam solos bem desenvolvidos e profundos, provenientes do intemperismo de rochas presentes na região. A rocha que originou o solo constituinte dessa região é o arenito, muito comum nas áreas rochosas do município. A espessura do manto inconsolidado desta região é da ordem de 40 m. Perfurações realizadas pela Petrobrás, para prospecção de petróleo, a 40 km ao sul da sede do município, encontraram o arenito do Grupo Botucatu. Próximo a prefeitura do município, no campo experimental, perfurações de poços profundos não encontraram a camada rochosa até a profundidade de 150 m.

Análises térmicas diferenciais deste solo, realizadas por CONCIANI (1997), indicam a presença de argilominerais característicos de solos lateríticos tais como: limonita, goetita, hematita e caulinita.

### 3.1.6 – SOLO DE RONDONÓPOLIS

A amostra de solo estudado na cidade de Rondonópolis foi coletada ao lado da estação meteorológica da UFMT (Universidade Federal de Mato Grosso). O município está

situado a 212 km ao sul de Cuiabá (latitude 16°15'00" latitude Sul, 54°51'55" longitude Oeste Gr, altitude média de 284 m). O solo típico dessa região é o Latossolo Vermelho Amarelo, do tipo areno-argiloso. Quanto ao relevo, pertence à Depressão Rio Paraguai, calha rio São Lourenço, Serra de São Jerônimo. A região de Rondonópolis está assentada sobre um embasamento de arenito do Grupo Furnas. Em alguns locais, sobrepõem-se a este sedimento uma camada de cascalho, de espessura variável, envolvida por uma camada de material areno-argiloso, com espessura que varia de alguns centímetros a alguns metros. Na sua formação geológica, encontram-se coberturas não dobradas do Fanerozóico, sub-bacia Ocidental da Bacia do Paraná.

Análises térmicas diferenciais deste solo realizadas por CONCIANI (1997) indicam a presença de argilominerais característicos de solos lateríticos.

A Tabela 3.1 apresenta um resumo das propriedades dos solos estudados. Ela mostra que os cinco solos estudados pertencem à classes pedológicas diferentes. De acordo com a classificação unificada tem-se nesta tabela: 02 solos CL, 02 solos ML e um SP.

De acordo com os resultados dos ensaios, o solo do aterro sanitário, o solo da Chapada dos Guimarães e o solo de Rondonópolis podem ser classificados como solos siltosos. O solo da região do Distrito Industrial de Cuiabá pode ser classificado como solo arenoso e o solo de Campo Novo do Parecis, pode ser classificado como um solo argiloso. Os dados mostram que o Latossolo Vermelho Escuro e Latossolo Vermelho-Amarelo são os que apresentaram maior porosidade, enquanto que o solo Litólico foi o que apresentou menor porosidade.

### **3.2 – EQUIPAMENTO DE TDR E OUTROS EQUIPAMENTOS EMPREGADOS**

Na realização deste trabalho, foi utilizado um testador de cabos, de fabricação americana, da marca TECTRONIX, modelo 1502 C. A Figura 3.2 mostra uma foto deste equipamento. O equipamento dispõe de um gerador de funções, que gera ondas eletromagnéticas, na frequência de 1,2 Ghz. O testador permite fixar a velocidade de propagação do sinal eletromagnético.

TABELA 3.1 – Caracterização física dos solos estudados

Propriedade	Aterro Sanitário de Cuiabá	Chapada dos Guimarães	Areia de Goma de Cuiabá	Campo Novo do Parecis	Rondonópolis
$\gamma_s$ (kN / m <sup>3</sup> )	26,30	27,93	24,80	27,10	28,56
$\gamma_D$ (kN / m <sup>3</sup> )	16,30	12,70	12,10	10,80	10,20
E	0,62	1,19	1,05	1,90	1,80
W <sub>L</sub> (%)	39	56	S. L. Liq.	45	33
W <sub>P</sub> (%)	11	48	N. Plast.	36	25
Ip	28	8	-	9	8
Areia (%)	7,95	33,20	69,10	9,90	46,80
Silte (%)	35,01	12,30	30,20	50	10,80
Argila (%)	57,04	54,50	0,70	40,10	42,40
Classe SUCS	CL	ML	SP	ML	CL
Classe pedológica	Litossolo	Podzólico Vermelho – Amarelo	Areias quartzozas	Latossolo Vermelho Escuro	Latossolo Vermelho Amarelo

$\gamma_s$  - Peso específico da fração sólida;  $e$  - Índice de vazios; W<sub>L</sub> – Limite de liquidez;  
 $\gamma_d$  - Peso específico do solo seco; W<sub>P</sub> - Limite de plasticidade Ip – Índice de plasticidade

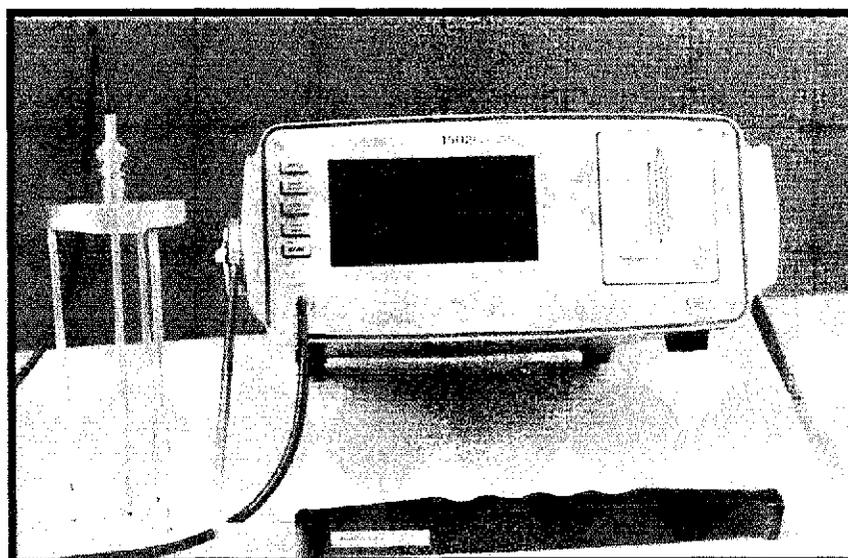


Figura 3.2: Testador de cabos empregado neste estudo.

Como se pode verificar na Figura 3.2, esse equipamento é dotado de um osciloscópio, que permite a visualização da onda refletida na tela e a identificação dos pontos para medidas do comprimento virtual,  $S_{tdr}$ . Associado ao *display* do osciloscópio, há um contador de tempo, que é acionado no instante em que um sinal é gerado, emitido e retornado à fonte, através de um cabo coaxial.

Com o valor de  $S_{tdr}$  e o comprimento da sonda ou a altura da célula coaxial, calcula-se a constante dielétrica do solo, empregando-se a Equação 2.3, mostrada no Capítulo 2.

Para este trabalho, foram empregados cabos coaxiais de  $50 \Omega$ . Estes cabos ligam o testador de cabos às sondas. O emprego deste cabo deve-se às características de impedância das sondas e dos equipamentos, pois, os cabos coaxiais reduzem os ruídos na captação dos sinais. Para ligação dos cabos com as sondas e com o testador de cabos empregaram-se conectores do tipo pino e bucha banana.

Na calibração do solo para medição da constante dielétrica, foi utilizada uma célula que buscou reproduzir a condição do cabo coaxial. Para isto, a blindagem do cabo foi substituída por um cilindro oco de latão, usado no ensaio de compactação de solo. Este cilindro tem 153 mm de diâmetro e 179 mm de altura. O cabo propriamente dito foi substituído por um eixo de latão que conduz o sinal para dentro do cilindro. O isolamento do cabo foi substituído pelo solo. A haste da tampa da base do cilindro foi isolada eletricamente, utilizando-se bucha e arruela de plástico rígido para evitar curto circuito do sinal eletromagnético. A Figura 3.3 apresenta a célula coaxial construída para este trabalho.

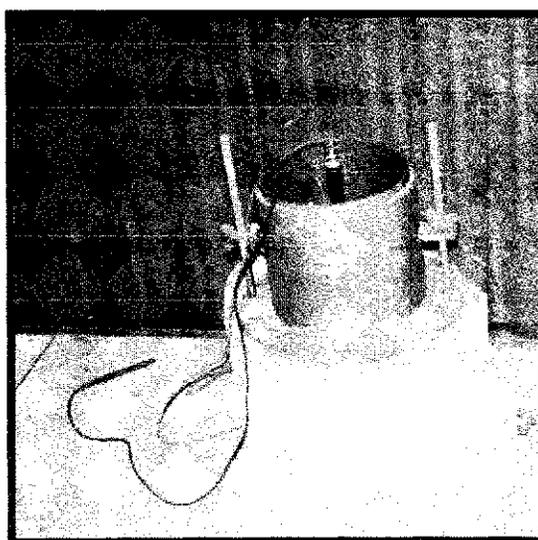


Figura 3.3: Célula coaxial empregada neste trabalho.

O sinal eletromagnético gerado pelo equipamento de TDR se propaga pelo fio central do cabo coaxial e retorna pela malha separada e isolada do mesmo. No instante da medida, o fio central do cabo coaxial é conectado à haste, enquanto a malha externa do cabo coaxial, que recebe o sinal de retorno, é conectada na borda externa do cilindro.

No cilindro, o sinal se propaga pela haste metálica central e, para retornar à fonte, atravessa a camada de solo colocado no interior do mesmo, o seu corpo metálico, e alcança a malha externa de retorno.

### **3.3 – PREPARAÇÃO DO SOLO - CALIBRAÇÃO**

A calibração de cada tipo de solo selecionado teve por finalidade correlacionar a constante dielétrica medida, empregando-se a técnica TDR com a umidade volumétrica de cada amostra de solo e correlacionar a constante dielétrica de cada amostra de solo com o peso específico de solo seco.

Para correlacionar a constante dielétrica com a umidade volumétrica, foram moldadas várias amostras com a mesma forma de preparação (colocação em molde por compactação do solo), variando-se o teor de umidade do solo. Os procedimentos foram como os descritos a seguir:

- Peneiramento, utilizando-se peneira com malha de 2 mm para separação de resíduos;
- preparação de cada amostra de solo em caixa numerada de madeira para identificar cada tipo de solo;
- secagem da amostra de solo numa estufa, graduada para temperatura de 105°C a 110°C, por um período de 12 horas, com massa suficiente para 10 kg depois do solo seco;
- retirada do cabo coaxial adaptado no cilindro, antes da compactação da amostra de cada tipo de solo, evitando com isto o esmagamento do cabo pelo soquete;
- compactação de cada amostra de solo segundo o procedimento de Proctor com energia intermediária;
- ligação do cabo coaxial ao cilindro, após a compactação da amostra de solo;

- ligação do cabo coaxial do cilindro ao instrumento de TDR, para ajuste, leitura e medida da constante dielétrica da amostra de solo;
- alteração do teor de umidade do solo em aproximadamente 5%, adicionando-se quantidade exata de água, de acordo com o referido cálculo, procedendo-se em seguida a mistura da massa de solo até que a umidade se tornasse uniforme;
- acomodação da amostra de solo numa sacola plástica para homogeneização do teor de umidade da mesma;
- compactação, pesagem e medição da constante dielétrica da amostra, com novo teor de umidade, seguindo os procedimentos já apresentados. Repetição do processo, aumentando-se o teor de umidade da amostra de cada tipo de solo em 5%, até que a amostra de solo adquirisse umidade no limite da saturação;
- cálculo dos valores da constante dielétrica (cada amostra de solo, empregando-se a Equação 2.3, de acordo com o teor de umidade);
- cálculo da umidade volumétrica ( $\theta$ ) das referidas amostras;
- construção da curva de calibração, relacionando a umidade volumétrica à constante dielétrica indicada pelo instrumento de TDR.

Para correlacionar a constante dielétrica com o peso específico do solo seco, cada tipo de solo foi compactado mantendo o seu teor de umidade aproximadamente constante, em torno de 15%, variando-se a energia de compactação.

Utilizou-se um soquete de 4,5 kg de massa, aplicando N golpes em cada camada de amostra de solo no interior do cilindro, previsto para completar o volume com cinco camadas. O número de golpes, N, em cada processo de compactação variou de acordo com a energia desejada, sendo respectivamente 5, 10, 20 e 40. Para manter o solo com teor de umidade em aproximadamente 15%, adicionou-se 50 ml de água à amostra, após o final de cada processo de compactação. Este acréscimo de água teve por finalidade, repor a perda de umidade da amostra, no instante do processo de compactação. Com os dados obtidos, traçou-se a curva de calibração do peso específico de solo seco ( $\gamma_d$ ) em função da constante dielétrica ( $\epsilon$ ).

Após calibrações das amostras de solos selecionados, foram utilizadas amostras de solo poluído por chorume, do aterro sanitário do município de Cuiabá. Para prevenir algumas alterações nas propriedades químicas e biológicas das amostras de solo poluído, essas amostras não foram secas em estufas como as demais, mas sim, secas naturalmente.

Na manipulação das amostras desse tipo de solo, antes de efetuar a compactação e medições da constante dielétrica, foram usados equipamentos de proteção individual para proteger o operador de eventual contaminação. Foram utilizadas luvas de borracha e máscara profissional. A verificação do teor de umidade da amostra antes da compactação foi realizada através da técnica do álcool.

A calibração do solo poluído teve por objetivo correlacionar a constante dielétrica com a umidade volumétrica e depois compará-la com a do solo natural. O ensaio de compactação da amostra de solo poluído foi realizado empregando o mesmo cilindro e a mesma energia de compactação. Como nos demais tipos de amostras de solos, foram aplicados 12 golpes em cada camada, em cinco camadas, variando-se o teor de umidade da amostra em 5%, em cada processo, até que a umidade da amostra ficasse próxima à saturação. Após cada processo de compactação, fez-se a medição da constante dielétrica da amostra compactada no cilindro, empregando-se a técnica TDR.

## **CAPÍTULO IV**

### **RESULTADOS E DISCUSSÕES**

#### **4.1 – ENSAIOS COM VARIAÇÃO DE UMIDADE.**

Nas Tabelas 4.1 a 4.6 são apresentados os resultados dos ensaios realizados com as amostras dos locais especificados. Nas tabelas citadas, os ensaios foram realizados variando-se o teor de umidade de cada amostra de solo, mantendo-se constante a energia de compactação.

Como pode ser observado nas tabelas, o peso específico do solo seco variou para as diversas medidas realizadas em solo. Esta variação é indesejável, por alterar a condição de porosidade do solo. Por outro lado, os valores de umidade volumétrica são expurgados desta variável, uma vez que consideram a quantidade de água em relação ao volume do solo.

Com os dados da constante dielétrica e umidade volumétrica, traçou-se a curva de calibração de cada tipo de solo, de acordo com os dados mostrados nas Tabelas 4.1 a 4.6.

Nos ensaios de compactação, foi observado que, variando-se o teor de umidade de cada tipo de solo numa faixa de 5%, a constante dielétrica do solo aumentou o seu valor em até 50% em relação ao valor que apresentava quando o teor de umidade da amostra estava em torno de 0 %. Estes resultados confirmaram a conclusão de DAVIS & ANNAN (1977), onde foi constatado que a água é um fator determinante na alteração da constante dielétrica do solo.

#### **4.1.1 – SOLO DO ATERRO SANITÁRIO DE CUIABÁ**

Na Tabela 4.1 são apresentados os dados para calibração referente ao solo do Aterro Sanitário de Cuiabá. As umidades gravimétrica e volumétrica nesta série de ensaios variaram entre 0 e 25%. Esta variação é típica de solos siltosos submetidos ao ensaio de

compactação. O peso específico seco deste solo também variou. A variação ficou entre 10 e 15 kN / m<sup>3</sup>. Nesta série de medidas a constante dielétrica ficou entre 3,11 e 20,59.

Tabela 4.1 – Resultados dos ensaios da amostra de Solo Natural do Aterro Sanitário

$\omega$	$\gamma$	$\gamma_d$	$\theta$	$\varepsilon$
	kN / m <sup>3</sup>	kN / m <sup>3</sup>	%	-
0,23 %	10,06	10,04	0,23	3,11
5,00 %	10,91	10,39	5,20	3,88
9,66 %	14,48	13,32	12,75	6,16
14,91 %	15,88	13,82	20,61	8,47
19,00 %	17,33	14,56	27,66	14,19
24,58 %	18,93	15,20	37,36	20,59

Na Figura 4.1 observa-se a correlação entre a constante dielétrica e a umidade volumétrica. O melhor ajuste obtido foi do tipo polinomial, de grau 3. Este ajuste apresentou um  $R^2 = 0,9913$ , para um nível de significância ( $\alpha$ ) de 5 %.

Observa-se que os pontos estão distribuídos de forma equidistante no primeiro trecho, até  $\theta=10$  %. Entre  $\theta=10$  % e  $\theta=36$  % os pontos assumem um espaçamento maior. Isto mostra que até  $\theta=10$  %, é pouco sensível à variação de umidade. Para valores de  $\theta \geq 36$  %, o solo é assumido como estando próximo da completa saturação. Desta forma se pode afirmar que o máximo valor de  $\varepsilon$ , neste solo, está em torno de 20.

Na Figura 4.2 observa-se a correlação entre a umidade gravimétrica e a constante dielétrica. O melhor ajuste obtido também foi do tipo polinomial, de grau 3. Este ajuste apresentou um  $R^2$  igual a 0,9938, para um nível de significância  $\alpha$  de 5 %. Nesta figura observa-se o mesmo comportamento geral da Figura 4.1.

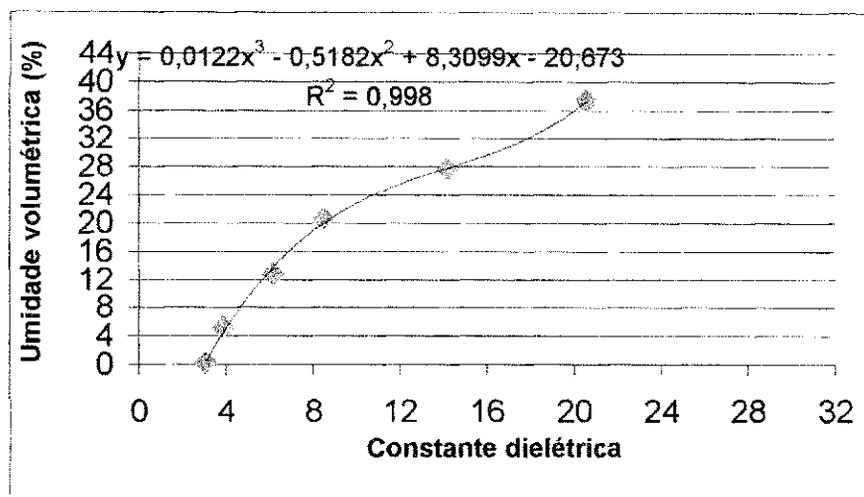


Figura 4.1: Correlação entre  $\theta$  e  $\epsilon$  para o solo do aterro sanitário de Cuiabá.

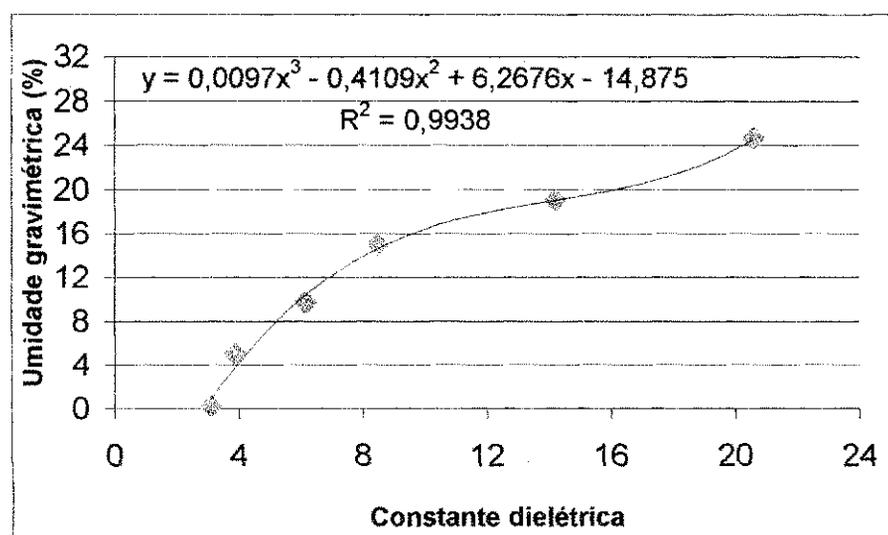


Figura 4.2: Correlação entre  $\omega$  e  $\epsilon$  para o solo do aterro sanitário de Cuiabá.

#### 4.1.2 – SOLO DO ATERRO SANITÁRIO DE CUIABÁ (POLUÍDO COM CHORUME)

Na Tabela 4.2 são apresentados os dados para a calibração referente ao solo poluído do aterro sanitário de Cuiabá. A umidade gravimétrica nesta série de ensaios variou entre 11,00% e 27,63%. A umidade da amostra no início do ensaio foi igual a 11,00%, porque

ela não foi seca em estufa. Ela foi seca ao ar livre para prevenir possíveis alterações nos componentes químicos e orgânicos da amostra. O peso específico seco deste solo alterou-se, variando entre  $15,0 \text{ kN / m}^3$  e  $15,8 \text{ kN / m}^3$ . O teor de umidade gravimétrica variou entre 11,09% e 27,63%. O teor de umidade volumétrica variou entre 16,65 % e 40,56 %.

Tabela 4.2– Resultados dos ensaios da amostra de Solo do Aterro Sanitário poluído com chorume.

$\omega$	$\gamma$	$\gamma_d$	$\theta$	$\varepsilon$
	$\text{kN / m}^3$	$\text{kN / m}^3$	%	
11,09 %	16,68	15,01	16,65	22,17
16,50 %	18,00	15,45	25,49	25,52
21,88 %	19,30	15,84	34,66	28,18
27,63 %	18,74	14,68	40,56	30,97

Na Figura 4.3 observa-se a correlação entre a constante dielétrica e a umidade volumétrica. O melhor ajuste obtido para esta curva foi também uma equação do tipo polinomial de grau 3. Este ajuste apresentou um  $R^2 = 1$ , para um nível de significância ( $\alpha$ ) de 5 %.

Observa-se que os pontos estão distribuídos de forma equidistante em praticamente toda a curva, desde  $\theta = 16,00 \%$  até  $\theta = 35 \%$ . Para  $\theta = 40 \%$  a amostra de solo do aterro sanitário se aproxima da completa saturação. Desta forma pode-se afirmar que o máximo valor de  $\varepsilon$ , neste solo, está em torno de 31.

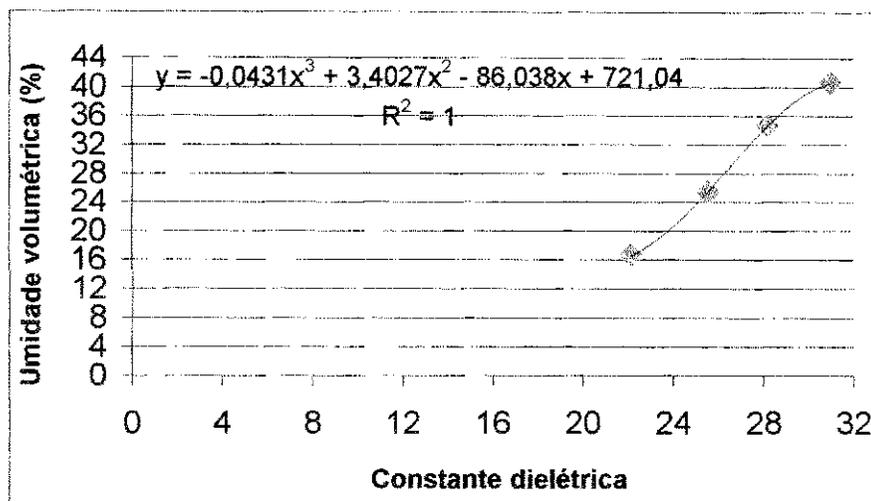


Figura 4.3: Correlação entre  $\theta$  e  $\epsilon$  para o solo do aterro sanitário de Cuiabá (contaminado com choroume).

#### 4.1.3 – SOLO DA CHAPADA DOS GUIMARÃES

Na Tabela 4.3 são apresentados os dados para calibração referente à amostra de solo da Chapada dos Guimarães. A umidade gravimétrica nesta série de ensaios variou entre 0,22 % e 24,79%. O peso específico seco variou entre 13,88 kN / m<sup>3</sup> e 14,96 kN / m<sup>3</sup>. Nesta série de medidas a constante dielétrica variou entre 3,23 e 20,59.

Tabela 4.3 – Resultados dos ensaios da amostra de Solo da Chapada dos Guimarães.

$\omega$	$\gamma$	$\gamma_d$	$\theta$	$\epsilon$
	KN / m <sup>3</sup>	KN / m <sup>3</sup>	%	-
0,22 %	13,91	13,88	0,30	3,23
5,35 %	15,00	14,24	7,60	4,96
11,16 %	15,70	14,12	15,70	7,07
15,58 %	16,18	14,00	21,80	9,50
20,30 %	17,00	14,13	28,70	13,55
24,79 %	18,67	14,96	37,10	20,59

Na Figura 4.4 observa-se a correlação entre a constante dielétrica e a umidade volumétrica, que satisfaz ao ajuste do tipo polinomial, de grau 3. Este ajuste apresentou um  $R^2 = 0,9996$ , para um nível de significância ( $\alpha$ ) de 5 %. Observa-se que os pontos estão distribuídos de forma equidistante no trecho compreendido entre  $\theta = 2,00\%$  e  $\theta = 28,00\%$ . Isto mostra que até  $\theta = 21,80\%$ ,  $\epsilon$  é pouco sensível à variação de umidade. No entanto, para  $\theta \geq 30\%$  o solo se aproxima da completa saturação. Desta forma pode-se afirmar que o máximo valor de  $\epsilon$ , neste solo, está em torno de 20,59.

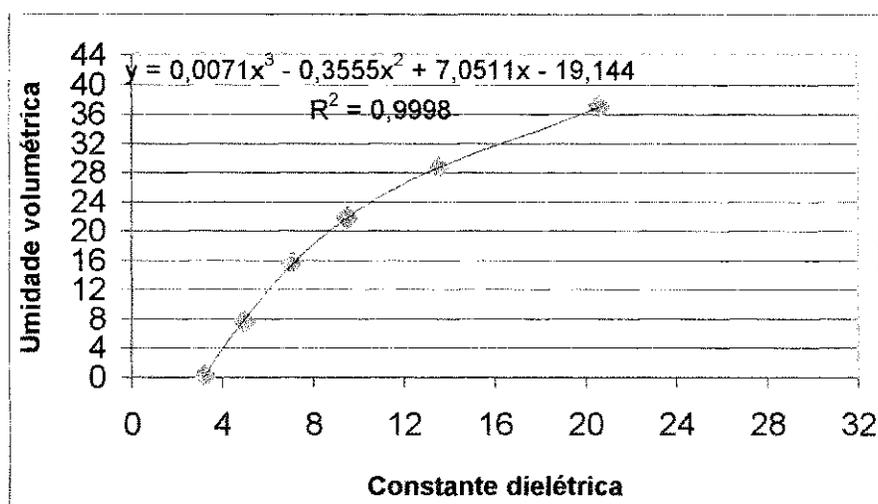


Figura 4.4: Correlação entre  $\epsilon$  e  $\theta$  do solo da Chapada dos Guimarães.

A Figura 4.5 mostra a correlação entre a constante dielétrica e a umidade gravimétrica. Novamente o melhor ajuste obtido foi do tipo polinomial, de grau 3. Este ajuste apresentou um  $R^2 = 0,9997$ , para um nível de significância ( $\alpha$ ) de 5 %.

Observa-se que os pontos estão distribuídos de forma equidistante no primeiro trecho até  $\theta = 15,58\%$ . Entre  $\theta = 13,55\%$  e  $\theta = 25,00\%$ , os pontos assumem um espaçamento maior. Isto mostra que até  $\theta = 13,58\%$ ,  $\epsilon$  é pouco sensível à variação de umidade. No entanto, para  $\theta \geq 25\%$  o solo se aproxima da completa saturação. Desta forma, pode-se afirmar que o máximo valor de  $\epsilon$ , neste solo, está em torno de 20.

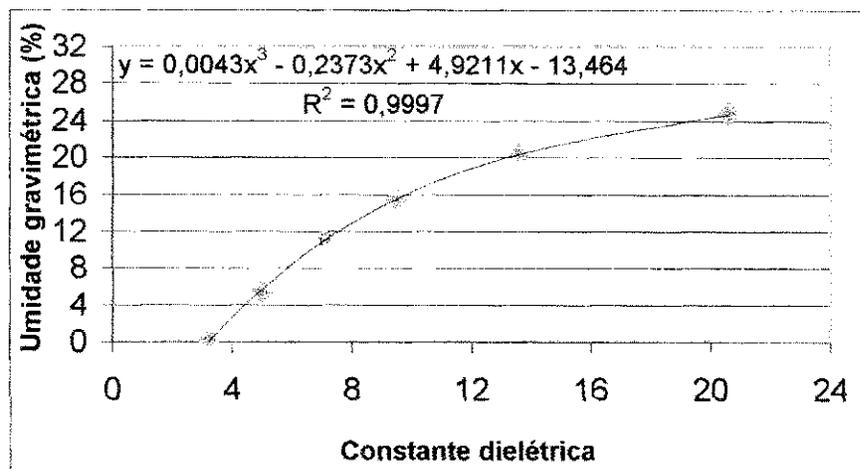


Figura 4.5: Correlação entre  $\omega$  e  $\epsilon$  para o solo de Chapada dos Guimarães.

#### 4.1.4 – AREIA DE GOMA

Na Tabela 4.4 são apresentados os dados para calibração referente à areia de goma, amostra de solo da área 3, município de Cuiabá. A umidade gravimétrica nesta série de ensaios variou entre 0,16% e 18,79%. A umidade volumétrica variou entre 0,26 % e 30,85 %. O peso específico seco deste solo sofreu pequena alteração, variando entre 16,23 kN / m<sup>3</sup> e 16,42 kN / m<sup>3</sup>. Nesta série de medidas a constante dielétrica variou entre 2,93 e 20,59.

Tabela 4.4 – Resultados dos ensaios da amostra da Areia de Goma.

$\omega$	$\gamma$	$\gamma_d$	$\theta$	$\epsilon$
	KN / m <sup>3</sup>	KN / m <sup>3</sup>	%	-
0,16 %	16,26	16,23	0,26	2,93
5,32 %	17,64	16,75	8,91	6,16
10,32 %	20,73	18,79	19,39	13,55
14,38 %	19,79	17,30	24,88	19,06
18,79 %	19,50	16,42	30,85	20,59

Na Figura 4.6 observa-se a correlação entre a constante dielétrica e a umidade volumétrica, que produziu um ajuste do tipo polinomial, de grau 3. Este ajuste apresentou um  $R^2 = 0,9945$ , para um nível de significância ( $\alpha$ ) de 5 %.

Observa-se que os pontos estão distribuídos de forma equidistante no primeiro trecho até  $\theta=8$  %. Entre  $\theta=8$  % e  $\theta=20$  % os pontos assumem um espaçamento maior. Isto mostra que até  $\theta=8$  %  $\epsilon$  é pouco sensível à variação de umidade. No entanto, para  $\theta \geq 22$  % o solo se aproxima da completa saturação. Desta forma pode-se afirmar que o máximo valor de  $\epsilon$ , neste solo, está em torno de 20.

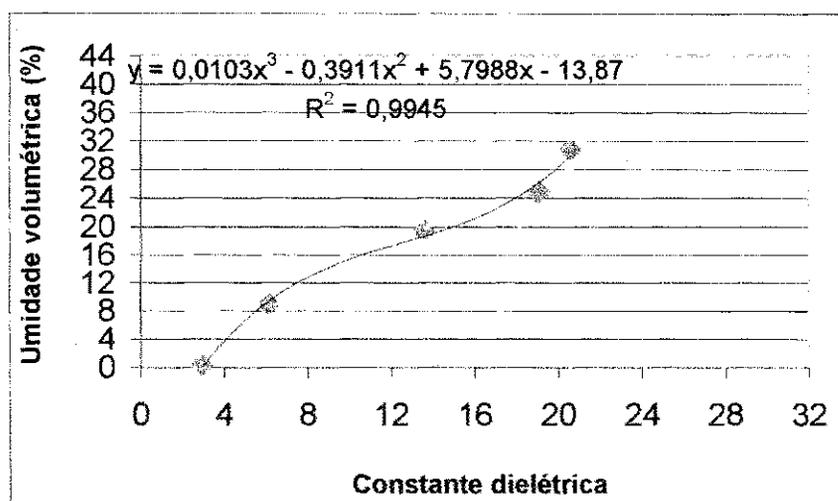


Figura 4.6: Correlação entre  $\epsilon$  e  $\theta$  da areia de goma.

Na Figura 4.7 observa-se a correlação obtida entre a constante dielétrica e a umidade gravimétrica, com ajuste do tipo polinomial, de grau 3. O ajuste apresentou um  $R^2 = 0,9946$ , para um nível de significância ( $\alpha$ ) de 5%.

Observa-se que os pontos estão distribuídos de forma equidistante no primeiro trecho até  $\omega=5$ %. Entre  $\omega=5$  % e  $\omega=15$  % os pontos assumem um espaçamento maior. Isto mostra que até  $\omega=5$  %,  $\epsilon$  é pouco sensível à variação de umidade.

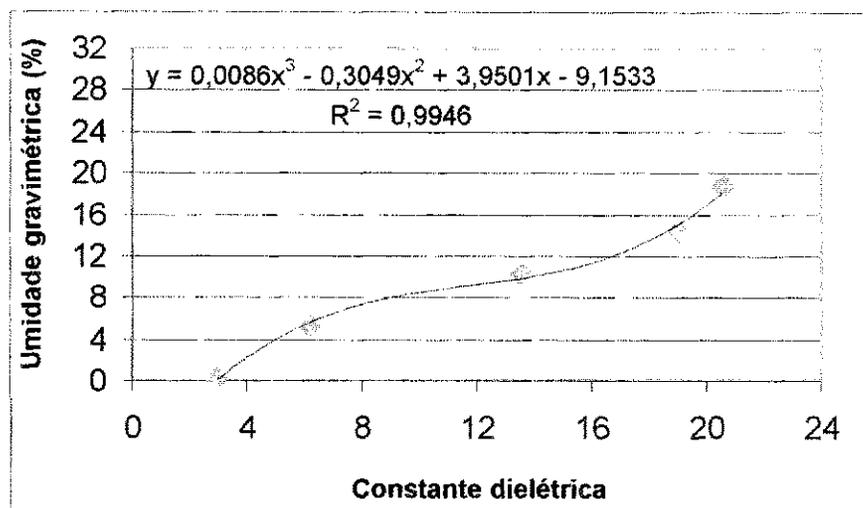


Figura 4.7: Correlação entre  $\omega$  e  $\varepsilon$  para a areia de goma.

#### 4.1.5 – SOLO DE CAMPO NOVO DO PARECIS

Na Tabela 4.5 são apresentados os dados para calibração referente a amostra de solo de Campo Novo do Parecis. A umidade gravimétrica nesta série de ensaios variou entre 1,24% e 30,40%. O peso específico seco deste solo variou entre 11,26 kN / m<sup>3</sup> e 13,10 kN / m<sup>3</sup>. Nesta série de medidas a constante dielétrica variou entre 3,55 e 19,06.

Na Figura 4.8 é apresentada a correlação entre a constante dielétrica e a umidade volumétrica, representado por ajuste do tipo polinomial de grau 3, com  $R^2 = 0,9969$ , e um nível de significância ( $\alpha$ ) de 5 %.

Tabela 4.5 – Resultados dos ensaios da amostra de Solo de Campo Novo do Parecis.

$\omega$ (%)	$\gamma$ KN / m <sup>3</sup>	$\gamma_d$ KN / m <sup>3</sup>	$\theta$ %	$\varepsilon$ -
1,24	11,40	11,26	1,40	3,55
6,47	11,93	11,20	7,25	4,96
12,37	12,40	11,03	13,64	7,04
18,28	13,22	11,18	20,44	8,47
23,85	13,31	10,75	25,64	10,58
28,70	16,89	13,12	37,65	14,19
30,40	17,08	13,10	39,82	19,06

Observa-se na Figura 4.8 que os pontos estão distribuídos de forma equidistante no primeiro trecho até  $\theta=15\%$ . Entre  $\theta=15\%$  e  $\theta=35\%$  os pontos assumem um espaçamento maior. Isto mostra que até  $\theta=15\%$   $\epsilon$  é pouco sensível à variação de umidade. Para  $\theta \geq 35\%$  o solo se aproxima da completa saturação. O máximo valor de  $\epsilon$  foi aproximadamente igual 19.

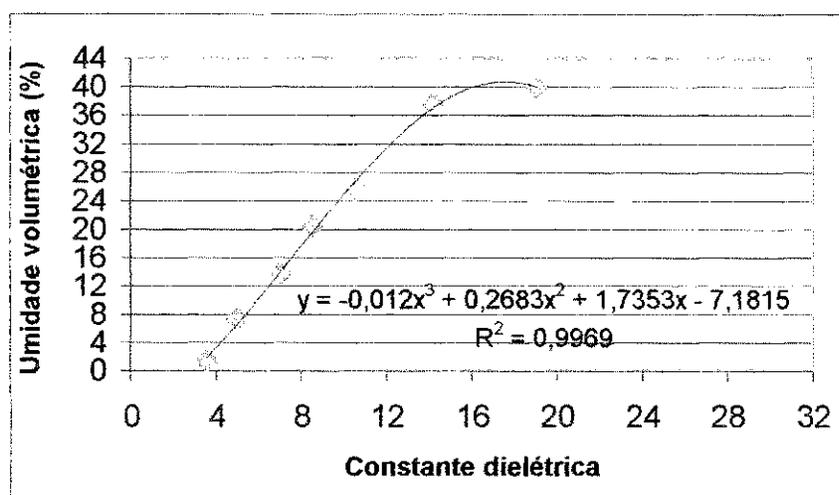


Figura 4.8: Correlação entre  $\epsilon$  e  $\theta$  do solo de Campo Novo do Parecis.

Na Figura 4.9 é observada a correlação entre a constante dielétrica e a umidade volumétrica. O ajuste obtido foi do tipo polinomial, com  $R^2 = 0,9968$  e um nível de significância ( $\alpha$ ) de 5%.

Observa-se que os pontos estão distribuídos de forma equidistante no primeiro trecho até  $\omega=10\%$ . Entre  $\omega=10\%$  e  $\omega=30\%$  os pontos assumem um espaçamento maior. Isto mostra que até  $\omega=10\%$   $\epsilon$  é pouco sensível à variação de umidade. No entanto, para  $\omega \geq 30\%$  o solo se aproxima da completa saturação. Desta forma pode-se afirmar que o máximo valor de  $\epsilon$ , neste solo, está em torno de 19.

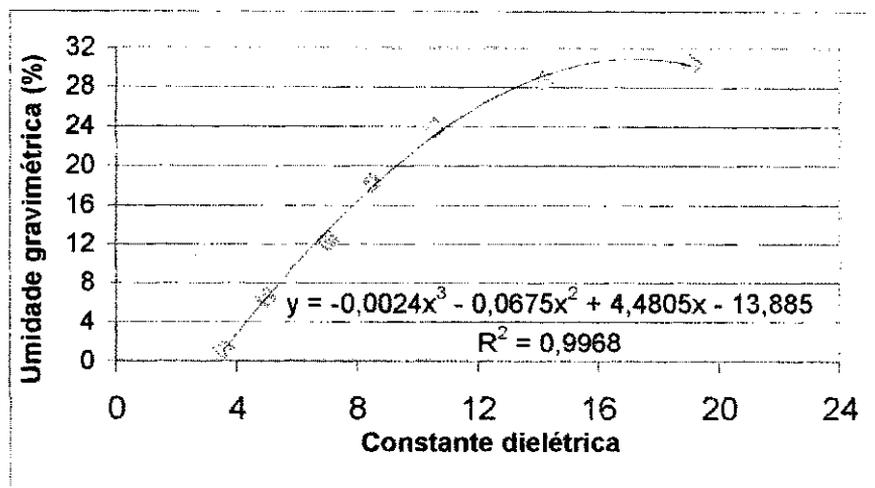


Figura 4 9: Correlação entre  $\omega$  e  $\epsilon$  para o solo de Campo Novo do Parecis.

#### 4.1.6 – SOLO DE RONDONÓPOLIS

Na Tabela 4.6 são apresentados os dados para calibração referente à amostra do solo de Rondonópolis. A umidade gravimétrica nesta série de ensaios variou entre 0,94% e 27,35%. O peso específico seco deste solo variou entre 13,67 kN / m<sup>3</sup> e 14,79 kN / m<sup>3</sup>. Nesta série de medidas a constante dielétrica deste solo variou entre 3,23 e 22,99.

Tabela 4.6 – Resultados dos ensaios da amostra de Solo de Rondonópolis.

$\omega$	$\gamma$	$\gamma_d$	$\theta$	$\epsilon$
	kN / m <sup>3</sup>	KN / m <sup>3</sup>	%	-
0,94 %	13,80	13,67	1,28	3,23
6,07 %	14,40	13,57	8,24	4,96
11,50 %	14,95	13,41	15,42	7,04
17,01 %	18,87	16,13	27,44	13,55
22,39 %	19,09	15,60	34,93	17,60
27,35 %	18,83	14,79	40,45	22,99

Na Figura 4.10 é mostrada a correlação obtida entre a constante dielétrica e a umidade volumétrica. O ajuste obtido apresentou um  $R^2 = 0,9977$ , com um nível de significância da ordem de 5 %.

Em função da forma da curva, pode-se afirmar que o máximo valor de  $\epsilon$ , neste solo, está em torno de 22.

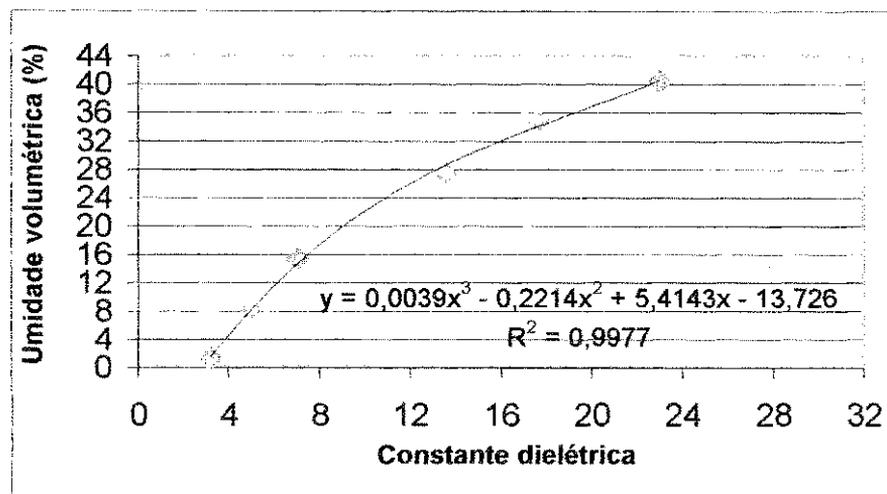


Figura 4.10: Correlação entre  $\epsilon$  e  $\theta$  do solo de Rondonópolis.

Na Figura 4.11 observa-se a correlação entre a constante dielétrica e a umidade gravimétrica. O melhor ajuste obtido foi do tipo polinomial, de grau 3. Este ajuste apresentou um  $R^2 = 0,9976$ , para um nível de significância de 5 %.

Observa-se que os pontos estão distribuídos de forma equidistante no primeiro trecho até  $\omega = 7,00$  %. Entre  $\omega = 7,00$  % e  $\omega = 23,00$  % os pontos assumem um espaçamento maior. Isto mostra que até  $\omega = 7,00$  % é pouco sensível à variação de umidade. No entanto, para  $\omega \geq 25,00$  % o solo se aproxima da completa saturação. Desta forma, pode-se afirmar que o máximo valor de  $\epsilon$ , neste solo, está em torno de 22,00.

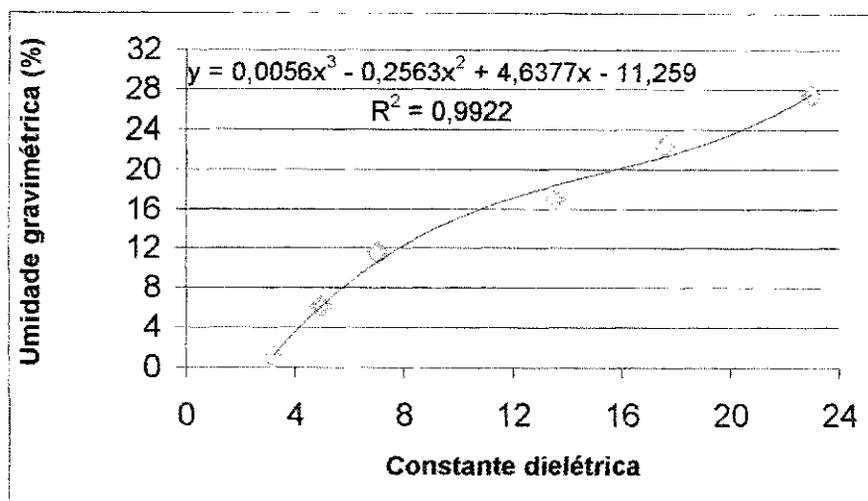


Figura 4.11: Correlação entre  $\theta$  e  $\epsilon$  para o solo de Rondonópolis.

#### 4.2 – RESULTADOS DOS ENSAIOS DAS AMOSTRAS DE SOLOS COM UMIDADE CONSTANTE

Nas Tabelas de 4.7 a 4.12 são apresentados os resultados dos ensaios realizados buscando manter constante o teor de umidade das amostras de solos

Esses resultados foram obtidos após realização de ensaios de compactação dessas amostras. O teor de umidade cada amostra de cada tipo de solo foi mantida constante e variou-se a energia de compactação. É importante observar nas tabelas seguintes que a umidade volumétrica de cada série de ensaios apresenta uma variação que pode chegar a  $\theta \pm 1\%$ . No final de cada processo, mediram-se: massa, volume e constante dielétrica. Os procedimentos seguintes foram como os descritos no item 3.3

Traçou-se para cada tipo de solo uma curva, comparando-se a variação da constante dielétrica em função da variação da porosidade e do peso específico do solo seco.

#### 4.2.1 – SOLO DO ATERRO SANITÁRIO DE CUIABÁ

Na Tabela 4.7 são apresentados os dados para calibração referente ao solo do Aterro Sanitário de Cuiabá, obtidos nos ensaios com umidade constante. O teor de umidade para o ensaio foi fixado em 15 %. A umidade volumétrica desse solo variou entre 18 % e 24 %. A Tabela 4.7 mostra ainda que o peso específico seco deste solo variou entre  $\gamma_d = 12,7 \text{ kN} / \text{m}^3$  e  $\gamma_d = 16,3 \text{ kN} / \text{m}^3$ . A energia de compactação empregada no ensaio variou entre 0,5 kj e 4 kj. Nesta série de medidas o valor da constante dielétrica ficou entre 7,04 e 16,19.

Tabela 4.7 - Solo Natural do Aterro Sanitário

$\gamma_d$ KN / m <sup>3</sup>	$\gamma$ KN / m <sup>3</sup>	$\theta$ %	$\varepsilon$ -	E J
12,70	14,60	18,05	7,04	496,13
14,30	16,40	20,85	8,98	992,25
15,60	17,90	22,88	12,32	1984,50
16,30	18,80	24,07	16,19	3969,00

Na Figura 4.12 observa – se a correlação entre o peso específico seco e a constante dielétrica, que foi ajustada por uma equação polinomial de grau 3. A Figura mostra que há variação no valor do peso específico seco do solo. Por consequência, surge a variação no valor da constante dielétrica da amostra do solo. A maior variação do peso específico seco foi de 12,6 %, que ocorreu no primeiro trecho da curva, apresenta valores entre  $\gamma_d = 12,7 \text{ kN} / \text{m}^3$  e  $\gamma_d = 14,3 \text{ kN} / \text{m}^3$ . A energia utilizada variou entre 0,5 kj e 1,0 kj, aproximadamente. A maior variação da constante dielétrica foi igual a 37,2 %, que ocorreu no segundo trecho da curva, onde o peso específico seco variou entre  $\gamma_d = 14,3 \text{ kN} / \text{m}^3$  e  $\gamma_d = 15,6 \text{ kN} / \text{m}^3$ . A energia utilizada variou entre 1,0 kj e 1,98 kj.

Essas variações são justificáveis. O peso específico seco aumentou porque a energia utilizada na compactação da amostra de solo provocou uma redução no índice de vazios dessa amostra. A constante dielétrica da amostra de solo aumentou porque houve

redução no índice de vazios, resultando uma redução no volume de ar presente na amostra do solo, facilitando a ocupação desse espaço por moléculas de água.

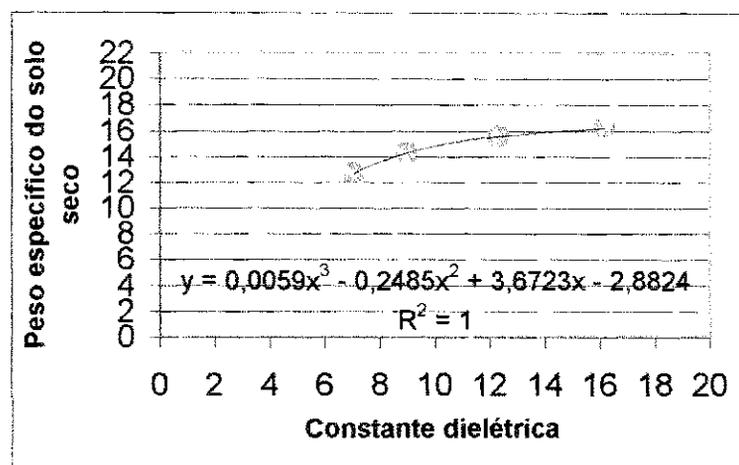


Figura 4.12: Correlação entre  $\epsilon$  e  $\gamma_d$  do solo do aterro sanitário de Cuiabá

#### 4.2.2 – SOLO DA CHAPADA DOS GUIMARÃES

Na Tabela 4.8 São apresentados os dados para calibração referente ao solo da Chapada dos Guimarães obtidos nos ensaios com umidade constante. O teor de umidade para o ensaio foi fixado também em 15 %. A umidade volumétrica desse solo variou aproximadamente entre 19 % e 26 %. Esta Tabela mostra ainda que o peso específico seco deste solo variou entre  $\gamma_d = 13,2 \text{ kN} / \text{m}^3$  e  $\gamma_d = 16,4 \text{ kN} / \text{m}^3$ . A energia de compactação empregada no ensaio variou entre 0,5 kJ e 4 kJ. Nesta série de medidas o valor da constante dielétrica ficou entre 7,98 e 15,51.

Tabela 4.8–Resultados dos ensaios da amostra de Solo da Chapada dos Guimarães

$\gamma_d$ KN / m <sup>3</sup>	$\gamma$ KN / m <sup>3</sup>	$\theta$ %	$\varepsilon$ -	E J
13,20	15,20	19,06	7,98	496,13
14,70	17,00	22,63	11,15	992,25
15,40	17,90	24,15	12,32	1984,50
16,40	19,10	25,97	15,51	3969,00

Na Figura 4.13 é apresentada a correlação obtida entre o peso específico seco e a constante dielétrica. O melhor ajuste para essa curva foi uma equação polinomial de grau 3. A Figura mostra que há variação no valor do peso específico seco do solo, por consequência, surge variação no valor da constante dielétrica da amostra do solo. A maior variação do peso específico seco foi de 11,36 %, ocorreu no primeiro trecho da curva entre  $\gamma_d = 13,2 \text{ kN / m}^3$  e  $\gamma_d = 14,7 \text{ kN / m}^3$ . A energia utilizada variou entre 0,5 kj e 1,0 kj, enquanto que a maior variação da constante dielétrica foi de 39,72 %, que ocorreu no primeiro trecho da curva, quando o peso específico seco variou entre  $\gamma_d = 13,2 \text{ kN / m}^3$  e  $\gamma_d = 14,7 \text{ kN / m}^3$ .

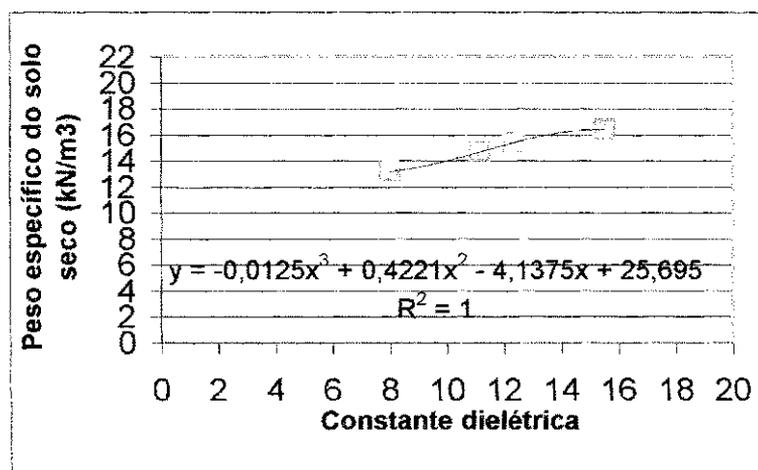


Figura 4.13: Correlação entre  $\varepsilon$  e  $\gamma_d$  do solo de Chapada dos Guimarães

### 4.2.3 – AREIA DE GOMA

Na Tabela 4.9 são apresentados os dados para calibração referente a Areia de Goma, obtidos nos ensaios com umidade constante. O teor de umidade para o ensaio foi previsto para 10 %, porque este valor próximo do valor da umidade ótima do solo. A umidade volumétrica desse solo variou entre 18,4 % e 19,88 %. A Tabela 4.9 mostra ainda, que o peso específico seco deste solo variou entre  $\gamma_d = 18,8 \text{ kN} / \text{m}^3$  e  $\gamma_d = 20,3 \text{ kN} / \text{m}^3$ . A energia de compactação empregada no ensaio variou entre 0,5 kJ e 4 kJ. Nesta série de medidas o valor da constante dielétrica ficou entre 11,15 e 19,06.

Tabela 4.9 – Resultados dos ensaios da amostra da Areia de Goma.

$\gamma_d$ KN / m <sup>3</sup>	$\gamma$ kN / m <sup>3</sup>	$\theta$ %	$\epsilon$ -	E J
18,80	20,70	18,4	11,15	496,13
20,20	22,30	20,31	14,84	992,25
20,20	22,30	19,95	17,60	1984,50
20,30	22,30	19,88	19,06	3969,00

A Figura 4.14 mostra a correlação entre o peso específico do solo seco e a constante dielétrica de um solo arenoso. Observa-se no primeiro trecho desta curva que o peso específico do solo seco variou de 18,80 kN/m<sup>3</sup> para 20,20 kN/m<sup>3</sup>, quando a energia de compactação empregada variou de 0,50 kJ para 1,00 kJ. Este intervalo mostrou uma variação do peso específico de 7,44 %. Este percentual é maior que a variação apresentada em outros pontos da curva. Também foi no primeiro trecho desta curva que se observou a maior variação da constante dielétrica desse solo, onde a diferença foi até 33,00 % maior que nos demais intervalos da curva. Nos demais trechos desta curva o peso específico do solo seco foi considerado constante porque a sua variação foi muito pequena.

Esta curva chama atenção para algumas particularidades:

- Ela mostra no primeiro trecho uma variação expressiva do peso específico do solo seco;

- Após este estágio, a variação se torna muito pequena, mesmo quando aumenta a energia em 100 %;
- A constante dielétrica aumenta no intervalo da curva onde o peso específico do solo seco foi considerado constante;

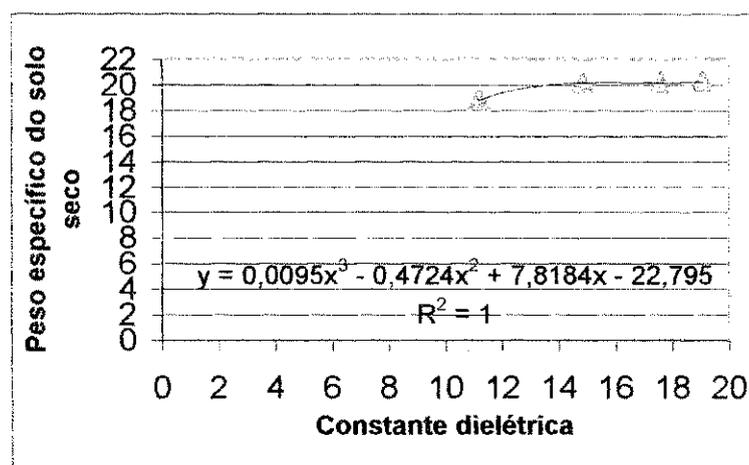


Figura 4.14: Correlação entre  $\epsilon$  e  $\gamma_d$  da Areia de Goma.

#### 4.2.4 – SOLO DE CAMPO NOVO DO PARECIS

Na Tabela 4.10 são apresentados os dados para calibração referente ao solo de Campo Novo do Parecis obtidos nos ensaios com umidade constante. O teor de umidade para o ensaio foi fixado em 20 %. A umidade volumétrica desse solo variou entre 21,27 % e 25,21 %. A Tabela mostra ainda que o peso específico seco deste solo variou entre  $\gamma_d = 10,8 \text{ kN} / \text{m}^3$  e  $\gamma_d = 12,0 \text{ kN} / \text{m}^3$ . A energia de compactação empregada no ensaio variou entre 0,5 kJ e 4 kJ. Nesta série de medidas, o valor da constante dielétrica ficou entre 8,47 e 12,32.

Tabela 4.10 – Resultados dos ensaios da amostra de Solo de Campo Novo do Parecis.

$\gamma_d$	$\gamma$	$\theta$	$\varepsilon$	E
$\text{KN} / \text{m}^3$	$\text{kN} / \text{m}^3$	%	-	J
10,80	13,00	21,27	8,47	496,13
11,20	13,50	22,56	9,50	992,25
11,70	14,20	24,11	11,15	1984,50
12,00	14,60	25,21	12,32	3969,00

A Figura 4.15 mostra a correlação entre o peso específico seco e a constante dielétrica. Observa-se nesta figura que a variação pode ser considerada linear. A maior variação do peso específico seco foi de 4,46 %, correspondem aos valores assumidos entre  $11,20 \text{ kN/m}^3$  e  $11,70 \text{ kN/m}^3$ , quando empregou-se no solo uma variação de energia de compactação entre 1,00 kJ e 1,98 kJ. Também se observa, que é no segundo trecho da curva que se verifica a maior variação da constante dielétrica deste solo argiloso. Esta variação foi de 17,37 %.

Esta curva chama atenção para outras particularidades:

- a curva é uma função aproximadamente linear;
- a maior variação da constante dielétrica ocorreu no segundo trecho da curva, onde foi maior a variação do peso específico seco.

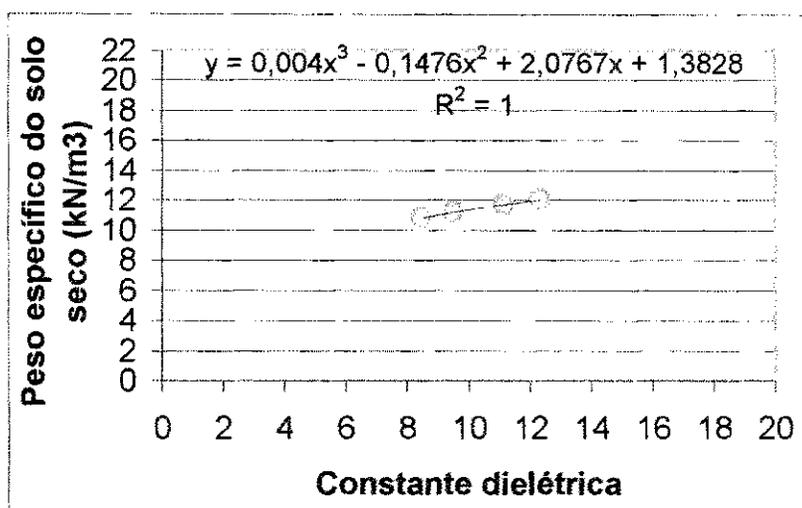


Figura 4.15: Correlação entre  $\epsilon$  e  $\gamma_d$  do solo de Campo Novo do Parecis.

#### 4.2.5 – SOLO DE RONDONÓPOLIS

Na Tabela 4.11 são apresentados os dados para calibração referente ao solo de Rondonópolis, obtidos nos ensaios com umidade constante. O teor de umidade para o ensaio foi fixado em 15 %. A umidade volumétrica desse solo variou entre 20,71 % e 27,86 %. A Tabela mostra ainda que o peso específico seco deste solo variou entre  $\gamma_d = 14,3 \text{ kN / m}^3$  e  $\gamma_d = 18,37 \text{ kN / m}^3$ . A energia de compactação empregada no ensaio variou entre 0,5 kJ e 4 kJ. Nesta série de medidas o valor da constante dielétrica ficou entre 10,03 e 18,32.

Tabela 4.11—Resultados dos ensaios da amostra de Solo de Rondonópolis.

$\gamma_d$	$\gamma$	$\theta$	$\epsilon$	E
$\text{KN / m}^3$	$\text{kN / m}^3$	%	-	J
14,30	16,40	20,71	10,03	496,13
15,70	18,00	22,72	12,93	992,25
17,40	20,00	25,4	14,84	1984,50
18,37	21,17	27,86	18,32	3969,00

A Figura 4.16 apresenta a correlação obtida entre o peso específico seco e a constante dielétrica, onde se observa uma curva que é representativa de um solo siltoso. A Tabela mostra que a variação do peso específico seco do solo influencia na variação no valor da constante dielétrica da amostra do solo. A maior variação do peso específico seco foi de 10,83 %, e ocorreu no segundo trecho da curva, onde assumiu valores entre  $\gamma_d = 15,7 \text{ kN/m}^3$  e  $\gamma_d = 17,4 \text{ kN/m}^3$ . Enquanto que a maior variação da constante dielétrica foi de 28,91 %, e se verificou no primeiro trecho da mesma curva, quando o peso específico seco variou entre  $\gamma_d = 14,3 \text{ kN/m}^3$  e  $\gamma_d = 15,7 \text{ kN/m}^3$ .

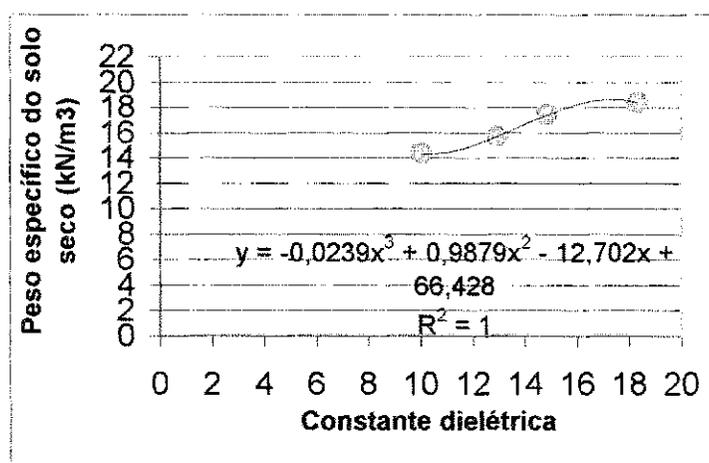


Figura 4.16: Correlação entre  $\epsilon$  e  $\gamma_d$  do solo de Rondonópolis.

### 4.3 – CONSTANTE DIELETRICA X UMIDADE VOLUMÉTRICA, ENSAIOS COM VARIAÇÃO DE UMIDADE.

Na Tabela 4.12 estão apresentadas as equações de calibração obtidas para os cinco tipos de solos selecionados em quatro municípios do Estado de Mato Grosso. As equações foram obtidas por meio do programa Excel<sup>®</sup>, quando foram fornecidos os valores da umidade volumétrica e os valores da constante dielétrica da amostra de cada tipo de solo. São equações polinomiais do 3º grau, obtidas pelo método dos mínimos quadrados com coeficiente de determinação ( $R^2$ ) variando de 0,97, para o solo de Campo Novo, a 0,99 para os solo dos municípios de Cuiabá, Chapada dos Guimarães e Areia de Goma.

Nas amostras dos vários tipos de solos estudados neste trabalho, o valor da constante dielétrica do solo seco variou entre 2,93 e 3,55. Os resultados de medidas com instrumento de TDR mostraram que houve variação no valor da constante dielétrica entre os vários tipos de solos, quando secos, de até 21%. Esses resultados contrariaram as conclusões de Topp *et al.* (1980), que em sua pesquisa, medindo o teor de umidade de amostras de solos, usando microondas, afirmaram que tipos de solos, densidade das amostras, temperatura e teor de sal tiveram efeitos essencialmente insignificantes na variação da constante dielétrica dos solos por eles estudados.

Tabela 4.12 – Equações de calibração obtidas com os 05 tipos de solos do estado de Mato Grosso.

Solo	Equação	R <sup>2</sup>
Aterro sanitário de Cuiabá	$\theta = -20,673 + 8,3099\epsilon - 0,5182\epsilon^2 + 0,0122\epsilon^3$	0,9980
Chapada dos Guimarães	$\theta = -19,144 + 7,0511\epsilon - 0,3555\epsilon^2 + 0,0071\epsilon^3$	0,9996
Rondonópolis	$\theta = -13,726 + 5,4143\epsilon - 0,2214\epsilon^2 + 0,0039\epsilon^3$	0,9977
Campo Novo do Parecis	$\theta = -7,1815 + 1,7353\epsilon + 0,2683\epsilon^2 - 0,012\epsilon^3$	0,9969
Areia de Goma de Cuiabá	$\theta = -13,87 + 5,7988\epsilon - 0,3911\epsilon^2 + 0,0103\epsilon^3$	0,9945
Aterro sanitário de Cuiabá (poluído com chorume)	$\theta = 721,04 - 86,038\epsilon + 3,4027\epsilon^2 - 0,0431\epsilon^3$	1,0000

A Figura 4.17 compara as curvas ajustadas para cada tipo de solo utilizado. Nesta Tabela observam-se três grupos de curvas. Há a curva do solo de Campo Novo do Parecis isolada na parte superior. Na parte inferior da Figura, encontra-se, isolada, a curva da Areia de Goma de Cuiabá. No centro, bem próximas estão as curvas dos solos de Chapada dos Guimarães, Rondonópolis e do Aterro Sanitário de Cuiabá.

Conforme se pode observar na Figura 4.18 a curva de Topp *et al.* (1980) está divergindo dos resultados das demais curvas. Esses pesquisadores admitiam um erro de até 2,5 % no valor da umidade, pela equação por eles proposta. Como pode ser visto, na Figura, o erro pode ser superior a 20 %.

A justificativa para as diferenças nos resultados encontrados por TOPP *et al.* (1980) e os resultados encontrados por outros pesquisadores, tais como HERRMANN (1993),

CONCIANI (1997), LAROSA *et al.* (1995), como também os encontrados neste trabalho, é atribuída à textura e composição química das partículas minerais que constituem o solo.

Nos solos estudados por TOPP *et al.* (1980) e sua equipe, as alterações devidas ao intemperismo são lentas por causa da baixa temperatura. O mesmo não ocorre com os solos tropicais. As alterações provocadas pelas variações de temperatura e umidade, promovem grandes alterações físicas e químicas nos minerais constituintes das rochas que dão origem aos solos. Esses fatores promovem alterações até no próprio solo.

Devido à posição geográfica e a proximidade da linha do equador, o estado de Mato Grosso tem duas estações bem definidas: o verão e o inverno. No verão, há predominância de muita chuva (no período de outubro a março) e altas temperaturas (em média 36°C). É um período onde ocorrem intensas alterações nas rochas e solos.

A água contribui com a alteração e transformação dos minerais constituintes das rochas, modifica as moléculas das substâncias ou compostos solúveis no solo, transporta os materiais mais finos para locais mais distantes, depositando-os nas áreas de menores declividades, modificando as texturas das partículas. Esses processos contribuem com a formação de solos com maiores teores de alumínio e ferro, ou de calcário e magnésio. São solos, em geral, com CTC baixa (em torno de 10 Meq/100g) mas com características eletromagnéticas interessantes. Segundo SANTOS *et al.* (1998), os teores de ferro em solos laterizados podem chegar a 18%. Entretanto, a atividade magnética destes solos é baixa ou nula.

No gráfico representativo da Areia de Goma (Figura 4.17) observa-se que a sua curva situa-se isolada e abaixo das demais. A curva mostra que uma variação no seu teor de umidade volumétrica, na faixa de 5% a 15%, resultou na alteração do valor da constante dielétrica, assumindo valores comparativamente mais elevados que as demais amostras de solos. Isto é, para menores variações de umidade ocorrem praticamente as mesmas variações de constante dielétrica.

A explicação para esse comportamento está na textura, forma geométrica e composição química das partículas constituintes da areia de goma. Conforme Shmugge (1983), quando se aumenta o teor de umidade de um solo arenoso, as interações das partículas do solo com as moléculas da água são muito pequenas. Quanto maior a concentração de quartzo como constituinte de solo, menor é a interação dessas partículas com as moléculas de água. Como resultado dessa pouca interação, maior quantidade de moléculas de água fica livre no solo. Essas moléculas de água livre influenciam no aumento do valor da constante dielétrica do solo. A razão disto é que as ondas

eletromagnéticas, na frequência de microondas, empregadas pelo TDR, têm a propriedade de orientar numa mesma direção, os dipolos das moléculas da água livre no solo. Dessa forma, aumenta-se o valor da constante dielétrica do solo.

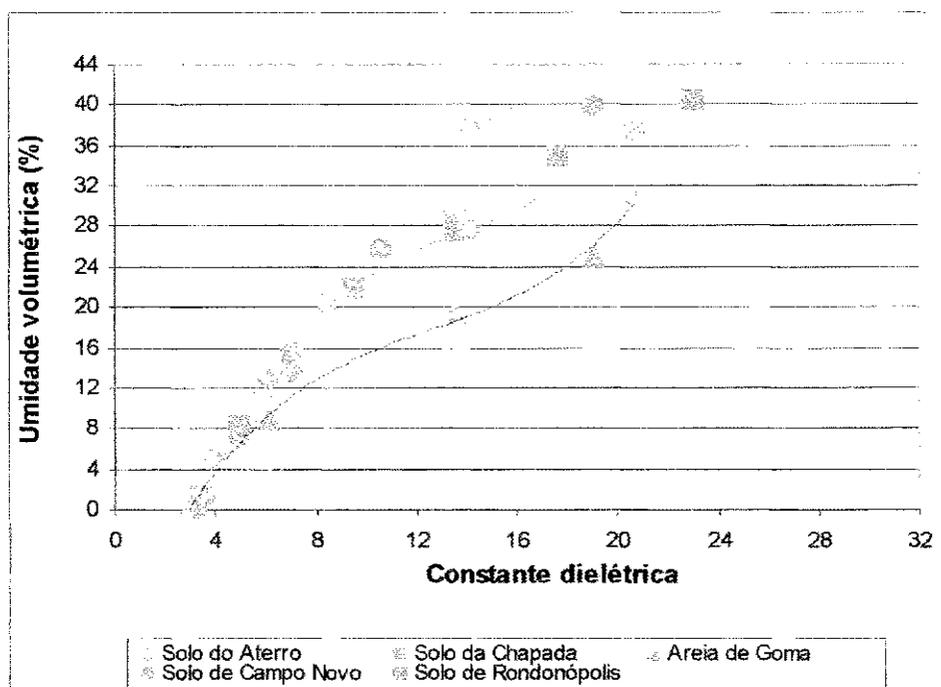


Figura 4.17: Comparação entre as curvas de calibração dos solos estudados.

A Figura 4.17 mostra que a curva do solo de Campo Novo do Parecis situa-se isolada e acima das demais. Nesta Figura pode ser observada que uma variação no seu teor de umidade volumétrica, na faixa de 5% a 20%, representa uma menor variação no valor da constante dielétrica em comparação com as demais.

A explicação para este comportamento do solo de Campo Novo está na sua textura, forma geométrica e composição química das partículas que constituem esse tipo de solo. Uma das características mais importante do solo é a existência de cargas elétricas (negativas ou positivas) em algumas de suas partículas. Isso acontece principalmente nas partículas com propriedades coloidais. Tais cargas podem atrair moléculas ( $H_2O$ ;  $N_2$ ;  $CO_2$ ;  $NH_3$ ;  $SO_2$ ). (TOMÉ JÚNIOR, 1997).

Portanto, quando um solo argiloso entra em contato com a água, suas partículas minerais interagem mais fortemente com as moléculas da água. Quanto maior a adsorção da água pelas partículas do solo, menor será a quantidade de água livre no solo. A água

livre é que interage diretamente com as ondas eletromagnéticas emitidas pelo TDR. Isto significa que o ar continua ocupando parte desses vazios, influenciando na alteração do valor da constante dielétrica do solo, visto que a constante dielétrica do ar, é em média, 80 vezes menor que a constante dielétrica da água livre. É essa interação das partículas minerais com as moléculas da água que explica porque esse tipo de solo apresenta uma constante dielétrica menor em comparação com os demais.

Observa-se na Figura 4.17 que a curva do solo de Campo Novo situa-se isolada, com umidade volumétrica, mais elevada e constante dielétrica mais baixa que as dos demais solos. Por outro lado, a curva da Areia de Goma situa-se isolada com menor umidade volumétrica em comparação com os outros gráficos representativos dos demais tipos de solos e apresenta um valor de constante dielétrica mais elevada que a do solo de Campo Novo do Parecis.

As curvas dos solos de Cuiabá (aterro sanitário), Chapada dos Guimarães e Rondonópolis são muito semelhantes. Isto indica um comportamento idêntico destes solos.

Outras comparações podem ser feitas observando-se os gráficos da Figura 4.17, que são representativos dos vários tipos de solos estudados neste trabalho. Observe-se, por exemplo, o caso das amostras de solo de Campo Novo do Parecis e Rondonópolis. Numa análise expedita, como comparação de cores das amostras e percepção tátil, seria razoável afirmar que os solos dessas duas regiões se constituem de uma família de solos com propriedades idênticas. No entanto, isto não foi confirmado nos ensaios.

Os ensaios para verificação dos índices físicos mostraram que o solo de Campo Novo do Parecis é um silte argiloso. Na classe pedológica este solo foi classificado como Latossolo Vermelho Escuro. O solo de Rondonópolis é areno-argiloso, mas na classe pedológica é classificado como Latossolo Vermelho - Amarelo. O resultado desse ensaio mostrou que a amostra de solo de Rondonópolis contém em média 35,10 % a mais de areia, considerando o mesmo volume da amostra de solo de Campo Novo do Parecis.

Uma outra diferença comprovada no comportamento e propriedades da amostra de solo de Campo Novo do Parecis e Rondonópolis foi na medida do valor da constante dielétrica com o instrumento de TDR. Quando as amostras foram submetidas a uma variação no teor de umidade volumétrica em torno de 10 % , a constante dielétrica da amostra de solo de Rondonópolis sofreu um acréscimo no valor da sua constante dielétrica em torno de 61 % em relação ao valor da constante dielétrica encontrada para a amostra de solo de Campo Novo do Parecis, considerando o mesmo teor de umidade volumétrica, o mesmo volume e a mesma energia de compactação.

A variação da constante dielétrica da amostra de solo de Rondonópolis foi mais acentuada que a de Campo Novo do Parecis, provavelmente devido aos seguintes fatores:

- as moléculas de água têm menor interação com as partículas do solo de Rondonópolis e maior interação com as partículas de solo de Campo Novo do Parecis. A amostra de solo de Campo Novo do Parecis apresentou maior porcentagem de argila em comparação com a amostra de solo de Rondonópolis;
- na amostra de solo de Rondonópolis, a porcentagem de água livre foi maior que a porcentagem de água livre presente na amostra de solo de Campo Novo do Parecis. A amostra de solo de Rondonópolis apresentou maior porcentagem de areia em comparação com a amostra de solo de Campo Novo do Parecis;
- as ondas eletromagnéticas emitidas pelo instrumento de TDR apresentaram maior interação com a amostra de solo de Rondonópolis em comparação com a amostra de solo de Campo Novo do Parecis. Como a sua porcentagem de água livre é menor que a porcentagem de água livre presente no solo de Rondonópolis, as ondas eletromagnéticas orientaram um número maior de moléculas de água na amostra de solo de Rondonópolis e um número menor de moléculas de água na amostra de solo de Campo Novo do Parecis;
- as ondas eletromagnéticas têm facilidade de orientar os dipolos da água livre na amostra de solo de Rondonópolis e mais dificuldade para orientar as moléculas de água que estão envolvidas com partículas minerais das amostras de solo de Campo Novo do Parecis.

#### **4.4 – CONSTANTE DIELETRICA VERSUS PESO ESPECÍFICO SECO PARA OS ENSAIOS COM UMIDADE CONSTANTE**

A Figura 4.19 mostra a variação da constante dielétrica, em função da variação do peso específico do solo seco dos cinco diferentes tipos de solos. De fato a Figura mostra a variação da constante dielétrica em função da porosidade do solo, que é medida indiretamente pelo peso específico seco. Da Figura observa-se que a variação da constante

dielétrica ocorre de forma mais suave que a variação da mesma em função do teor de umidade do solo.

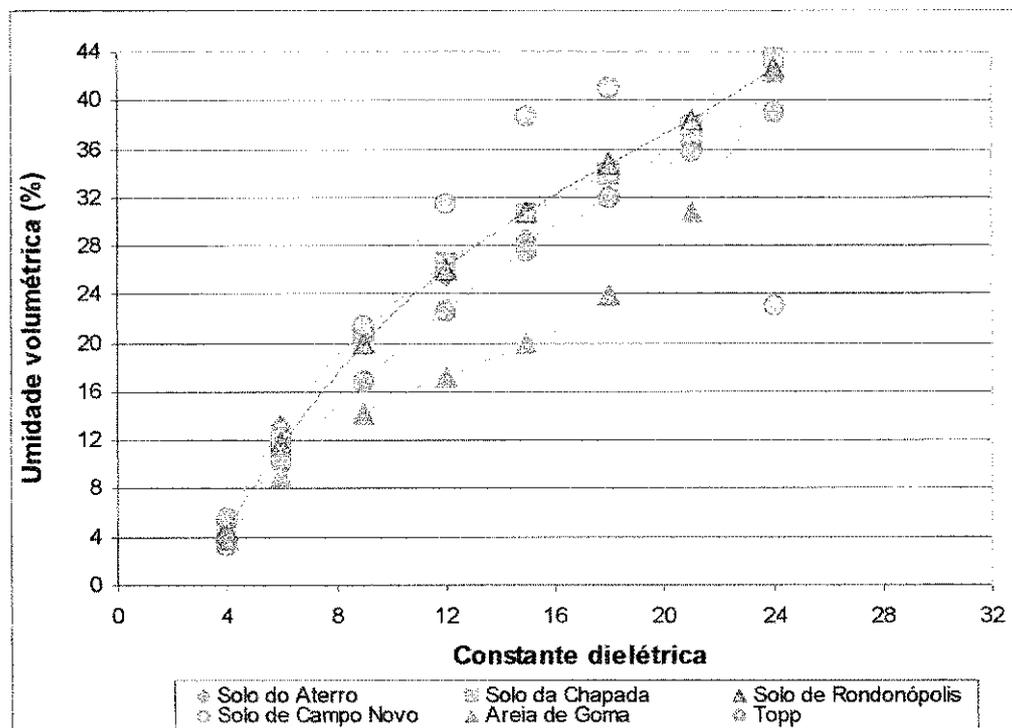


Figura 4.18: Curvas de calibração dos solos estudados comparados com a curva de TOPP *et al.* (1980).

A curva traçada com os resultados da umidade volumétrica e da constante dielétrica da Areia de Goma, situa-se isolada e acima das demais curvas. Isto significa que as interações químicas das partículas desse tipo de solo com as moléculas da água são muito pequenas, devido à grande quantidade de quartzo presente.

Foi observado no ensaio, a partir da medida da constante dielétrica com instrumento de TDR, que a amostra desse tipo de solo, foi a que apresentou menor capacidade de absorção d'água, e menor grau de saturação. Saturou-se a amostra com teor de umidade abaixo de 20%.

As curvas representativas das amostras de solos de Cuiabá (aterro sanitário), Chapada dos Guimarães e Rondonópolis estão próximas uma das outras, constituindo grupos de solos cujas propriedades são idênticas, com pequenas variações entre elas. HERRMANN (1993), ao questionar a proposta da equipe de TOPP *et al.* (1980), cita que

as variações das propriedades dos solos só podem ser desprezadas para alguns tipos de solos e em faixas de frequências bem definidas. Para o pesquisador HERRMANN, a validade da equação de TOPP *et al.* (1980), parece estar condicionada a algumas famílias de solos.

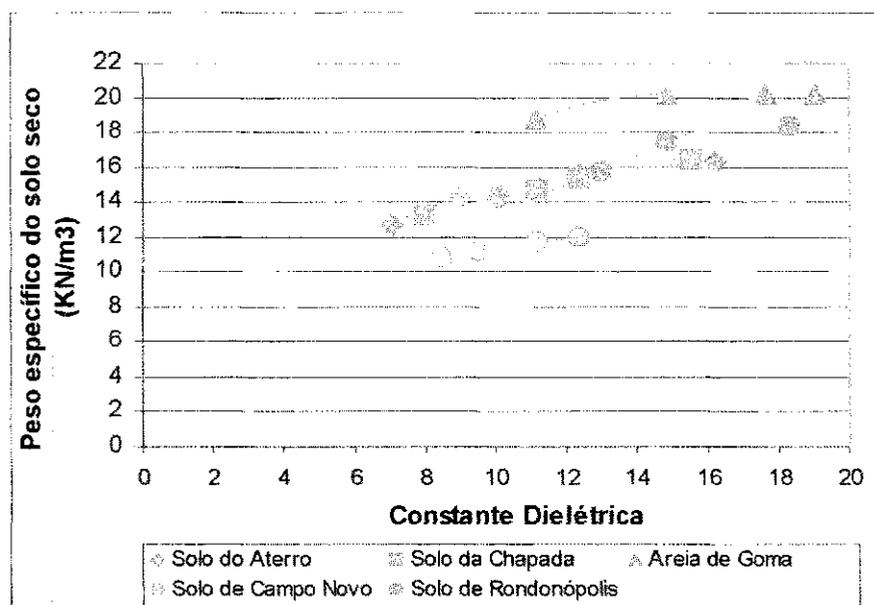


Figura 4.19: Comparação entre a constante dielétrica ( $\epsilon$ ) e peso específico do solo seco ( $\gamma_d$ ) mantendo-se constante a umidade do solo.

Na Figura 4.19 observa-se que a curva do solo de Campo Novo do Parecis se apresenta isolada e abaixo das demais curvas, indicando menor peso específico e menor valor de constante dielétrica. Dois fatores podem ter contribuído com os resultados desse tipo de solo, os quais são citados a seguir:

- i) este solo foi compactado com teor de umidade muito abaixo da sua umidade ótima instantânea da compactação, a umidade estava em torno de 15%, que é 50% menor que o teor de umidade ótima, que é superior a 35%. A pouca umidade do solo interfere na aglutinação das partículas do solo no instante da compactação. Por esta razão, a amostra do solo quando compactada produz pouca redução nos índices de vazios de suas partículas sólidas. A consequência desse processo resultou numa pequena alteração do seu peso específico e apresentou um valor de constante dielétrica muito menor em comparação com os resultados dos demais tipos de solos utilizados nos ensaios;

- ii) segundo, o solo de Campo Novo do Parecis tem textura argilosa, possui elevada capacidade de absorver água, porque as suas partículas sólidas interagem quimicamente com as moléculas da água. Moléculas que se associam com partículas do solo passam a receber menor influência das ondas eletromagnéticas geradas pelo equipamento de TDR. Essa influência diminui em virtude dos seus dipolos que não se orientam com a mesma facilidade que têm as moléculas da água livre em consequência, a constante dielétrica diminui.

Quando o solo é compactado, os índices de vazios diminuem de acordo com o teor de umidade a energia empregada no instante da compactação. O índice de vazios reduz o seu valor máximo, quando o teor de umidade do solo atinge a umidade ótima. Neste nível de umidade, o peso específico do solo alcança o valor máximo. Quando o teor de água no solo diminui, a compactação passa a ter menor efeito na aglutinação das partículas. O resultado desse processo, é a redução da constante dielétrica do solo devida à pouca redução dos seus índices de vazios. Considerando que a constante dielétrica do ar é em torno de 1, devido à baixíssima interação com as ondas eletromagnéticas geradas pelo equipamento de TDR, o solo em questão apresenta constante dielétrica menor que as demais, nas condições que foram impostas do teor de umidade e energia de compactação.

Também na Figura 4.19, observa-se que a curva da areia quartzosa destaca-se isolada acima das demais, apresentando maior peso específico e maior valor da constante dielétrica em comparação com as demais curvas. Isto se deve basicamente a dois fatores:

- a) a areia quartzosa foi compactada com teor de umidade próxima à da umidade ótima. É neste teor de umidade que o solo apresenta maior peso específico quando compactado;
- b) das amostras de solos utilizadas nos ensaios, a areia quartzosa foi a que apresentou menor capacidade de absorção de água devido à pequena interação química das moléculas de água com as partículas de quartzo que constituem a areia, resultando em maior quantidade de água livre ocupando os vazios do solo. Em consequência, surge maior interação desta com as ondas eletromagnéticas emitidas pelo equipamento de TDR no instante da medida da constante dielétrica. Por esta razão, a amostra apresenta constante dielétrica mais elevada que as demais.

#### 4.5 – INFLUÊNCIA DA POLUIÇÃO DO SOLO NA CONSTANTE DIELÉTRICA

Pesquisadores como AGNELI & ALBIERO (1997), têm relatado mudanças no comportamento mecânico dos solos colapsíveis devido à poluição. Em especial, enfatiza-se que estas mudanças decorrem da variação da constante dielétrica causada pela poluição do solo. Logo, é de se esperar que a curva de calibração de um solo mude quando esteja poluído.

Os ensaios e medidas para determinar a constante dielétrica de um solo, utilizando amostra de solo natural e amostra de solo contaminado por chorume, mostram que o chorume provocou uma alteração significativa no valor da constante dielétrica do solo natural do aterro sanitário do município de Cuiabá. Esta alteração pode ser vista na Figura 4.20.

Os ensaios e medidas com amostras de solo natural do aterro sanitário apresentou constante dielétrica com valor em torno de 3,11, para o solo seco. Quando foi aumentado o teor de umidade volumétrica da amostra para 7%, a constante dielétrica da amostra passou de 3,11 para 6,16, gerando um aumento de 98% no seu valor.

A constante dielétrica do solo do Aterro Sanitário poluído por chorume na condição seca é de 6,16. Quando a umidade volumétrica deste solo variou para 7 % a sua constante dielétrica variou para 22,17. Isto significa um aumento de 260 % no valor da constante dielétrica. Desta forma, percebe-se que o solo poluído tem os valores da constante dielétrica sensíveis à variação de umidade.

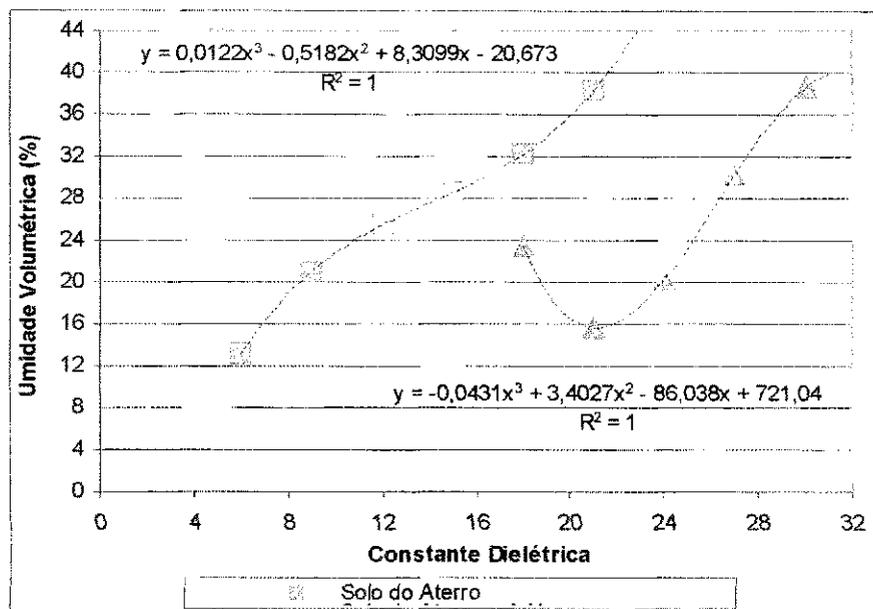


Figura 4.20: Comparação entre a constante dielétrica ( $\epsilon$ ) e a umidade volumétrica ( $\theta$ ) do solo natural e do solo poluído com chorume do Aterro Sanitário de Cuiabá.

#### 4.6 – EQUAÇÃO PARA DETERMINAR A UMIDADE DO SOLO A PARTIR DA CONSTANTE DIELÉTRICA

A Figura 4.21 apresenta uma curva que foi composta pelas curvas ajustadas para os solos do aterro sanitário de Cuiabá, solo da Chapada dos Guimarães e Solo de Rondonópolis. Como foram mostradas na Figura 4.17, essas curvas se mostraram muito próximas e com uma variação muito pequena, quando as condições de umidade ou de porosidade foram idênticas. Devido a essas características, pode-se afirmar que esses três tipos de solos constituem uma família de solos com propriedades compatíveis. De acordo com os resultados obtidos é possível calcular o valor da umidade volumétrica de um solo, utilizando a Equação 4.1, quando sua característica for compatível com as dos solos que foram representados pela curva da Figura 4.21, verificados para valores de constante dielétrica entre 3 e 23.

$$\theta = -17,02 + 6,58\epsilon - 0,33\epsilon^2 + 0,01\epsilon^3 \quad (4.1)$$

Outra observação interessante na curva da Tabela 4.21, é sua compatibilidade com a equação de TOPP *et al.* (1980), tida como de uso universal. Nesta família de solos, o erro resultante do uso desta equação para calcular a umidade volumétrica é tolerável.

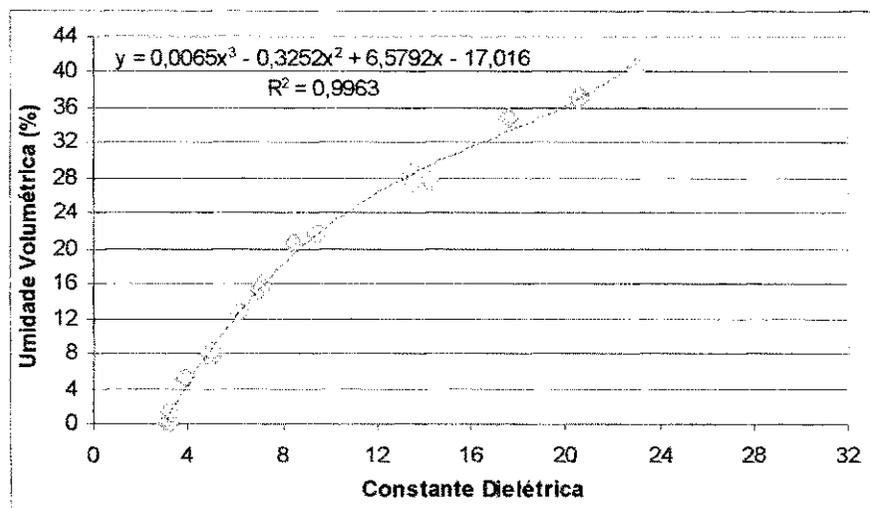


Figura 4.21: Ajuste dos pontos referentes aos solos (Litossolo; Podzólico Vermelho – Amarelo; Latossolo Vermelho Amarelo).

A Figura 4.22 compara as curvas de calibração dos solos estudados com a curva de TOPP *et al.* (1980). Nesta Figura, destacam-se três grupos de curvas: na parte superior – a curva do solo de Campo Novo do Parecis; no centro – a curva resultante representativa dos solos (Aterro Sanitário de Cuiabá, Chapada dos Guimarães e Rondonópolis) e a curva de TOPP *et al.* (1980) na parte inferior – a curva da Areia de Goma (areia quartzosa). O grupo de curvas dessa Figura mostra que a medida da constante dielétrica desses solos, pode ser utilizada para estimar a umidade volumétrica, para pequenos valores utilizando-se a equação de TOPP *et al.* (1980). Quando  $\theta$  for calculado, obtendo-se valores até 5%, a equação de TOPP será válida, visto que o erro será considerado desprezível. Valores de  $\theta$  entre 5% e 10%, estimados por meio da equação de TOPP *et al.* (1980), possuem erros toleráveis para o solo de Campo Novo do Parecis e para a Areia de Goma e vale para os demais solos estudados. Para a estimativa do teor de umidade volumétrica, na faixa entre 15% e 40%, a equação de TOPP *et al.* (1980) deixa de ser válida, para o solo de Campo Novo do Parecis e para a Areia de Goma, porque o erro pode chegar até 20%. Para os demais solos estudados, a equação de TOPP *et al.* (1980) pode ser utilizada, visto que o erro resultante da sua aplicação é tolerável.

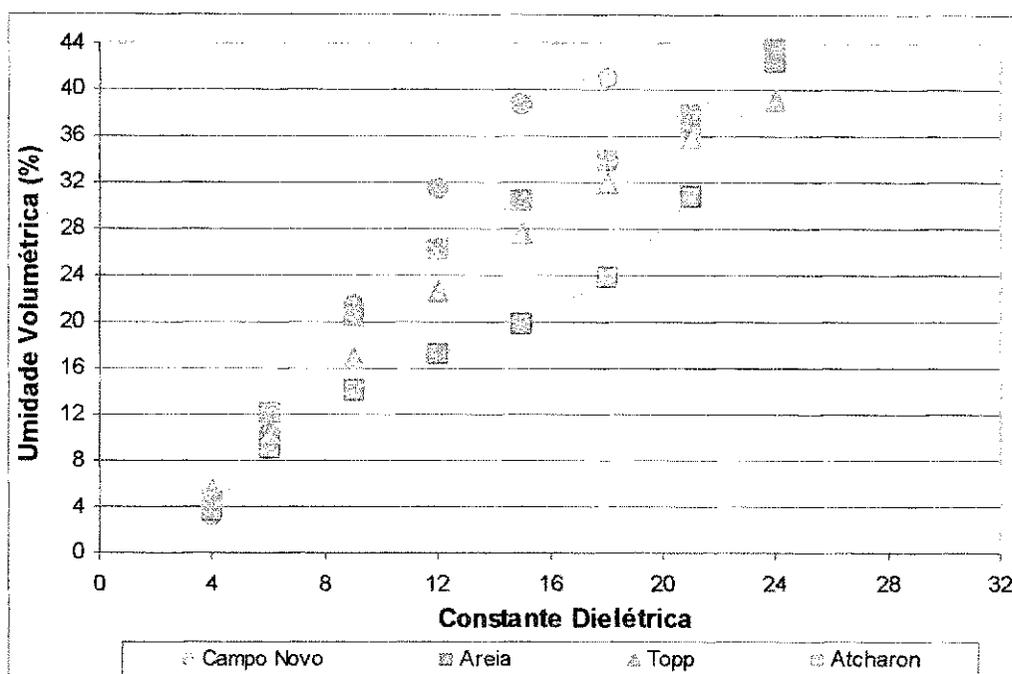


Figura 4.22: Comparação das curvas de calibração obtidas com a curva de TOPP *et al.* (1980).

A Figura 4.13 apresenta as propostas para os coeficientes empregados nas equações das curvas ajustadas para os tipos de solos estudados, ou seja. Solos Argilosos, Solos Arenosos e a famílias de solos (Argilo – Siltoso, Argilo – Arenoso e Areno – Argiloso). Estas propostas surgem como uma alternativa para se calcular o valor da umidade volumétrica em função do valor da constante dielétrica. Neste estudo, a equação que apresentou o melhor ajuste foi uma equação polinomial de grau 3. Nesta proposta, a curva para cada família de solos foi expressa pela equação geral:

$$\theta = A + B\varepsilon + C\varepsilon^2 + D\varepsilon^3 \quad (4.2)$$

Sendo: A o termo independente da equação polinomial

B o coeficiente da variável  $\varepsilon$ ;

C o coeficiente da variável  $\varepsilon^2$ ;

D o coeficiente da variável  $\varepsilon^3$ .

Para calcular a umidade do solo, é fundamental identificar o tipo de solo, de acordo com a classificação proposta na Tabela 4.13 e formar uma equação polinomial de grau 3,

utilizando os coeficientes propostos. Deve-se ainda determinar o valor da constante dielétrica do solo utilizando um instrumento de medida apropriado, e aplicar o resultado obtido na equação. Esta proposta é uma alternativa para se calcular o valor da umidade de um solo, porque neste estudo, utilizando vários tipos de solos, foi comprovado que a equação de TOPP *et al.* (1980) não deve ser utilizado para todos os tipos de solo tropicais. Este estudo mostra que não é recomendável utilizar a equação de TOPP *et al.* (1980), para calcular a umidade do solo em função da constante dielétrica, nos solos argilosos e nos solos arenosos, o que induz a erros que podem chegar até 20%. Este nível de erro pode por em risco a recomendação TOPP *et al.* (1980), que considera tolerável erro de até 2,5%, apenas.

Solos ( Famílias)	Coeficientes da equação					
	A	B	C	D	$\epsilon$ Sup.	$\epsilon$ Inf.
Solos Argiloso	-7,18	1,74	0,27	-0,01	19,06	3,55
Solos Arenosos (Areias Quartzozas)	-13,87	5,80	-0,39	0,01	20,59	2,93
Argilo – Siltoso: Litossolo Argilo–arenoso: Solo Podz. Verm. Areno-argiloso: Latos. Verm. Amar.	-17,02	6,58	-0,33	0,01	22,99	3,11

Tabela 4.13: Coeficientes de Equação 4.2 para calcular o teor de umidade volumétrica dos solos

#### 4.7 – ESTUDOS DAS EQUAÇÕES PROPOSTAS PARA DETERMINAR A UMIDADE VOLUMÉTRICA EM FUNÇÃO DA CONSTANTE DIELÉTRICA DO SOLO.

A Tabela 4.14 apresenta os resultados da aplicação da equação polinomial proposta neste trabalho. A sua finalidade foi verificar a abrangência das equações, de acordo com o tipo de solo, verificando se os erros encontrados são toleráveis.

Para testar as equações propostas, utilizaram – se os resultados dos ensaios e medições realizadas por RINALDI & FRANCISCA (1999), TRICHÊS & PEDROSO (2002), e ZEGELIN et al. (1989)

RINALDI & FRANCISCA (1999) realizaram ensaios e medidas utilizando um tipo de solo denominado de loess, classificado como silte – argiloso. Dois desses resultados, divulgados por eles, foram utilizados na verificação das equações propostas. Eles encontraram o valor da constante dielétrica igual a 5, quando o valor medido do teor de umidade volumétrica foi 5 %. Em outra medida, o valor da constante dielétrica foi igual a 22, quando o valor da umidade volumétrica foi igual a 39 %.

A equação geral proposta para a curva, de acordo com o solo, é a Equação 4.2. Na Tabela 4.14 selecionou – se os índices da Equação. Como neste caso os dados foram de um solo siltoso, os índices adotados foram:  $A = - 17,02$ ;  $B = 6,58$ ;  $C = - 0,33$ ;  $D = 0,01$ . Empregando-se a Equação 4.2, o valor de  $\epsilon$  foi igual a 5, o valor de umidade volumétrica foi 8,6 %. Este resultado é 3,6 % maior que o resultado medido. Utilizando-se nesta mesma equação o valor de  $\epsilon = 22$ , o valor da umidade volumétrica calculado passa para 39,6 %. Este resultado é 0,6 % maior que o resultado medido. Estes valores mostram que na aplicação da equação geral proposta para um solo do tipo siltoso, o maior erro cometido foi  $\Delta \theta = 3,6$  %. Este erro, está 1,1% acima do limite do erro admitido por Topp. et al. (1980), que foi  $\Delta \theta = 2,5$  %. Entretanto, como foi visto, utilizando-se  $\epsilon = 22$ , o erro encontrado, foi apenas  $\Delta \theta = 0,6$  %, o qual ficou dentro do limite de erro admitido e muito próximo do valor medido. Este resultado confirma que a Equação 4.2 foi válida para calcular o valor da umidade volumétrica em função da constante dielétrica.

TRICHÊS & PEDROSO (2002) divulgaram os resultados de ensaios e medições realizadas utilizando-se amostra de solo do tipo argilo – siltoso. Para verificar validade da equação geral proposta neste estudo, 4.2 utilizou – se os dados do trabalho que são  $\epsilon = 11,92$ , para uma umidade volumétrica igual a 23,7%. Por se tratar de um solo argilo siltoso, os índices propostos são:  $A = - 17,02$ ;  $B = 6,58$ ;  $C = - 0,33$ ;  $D = 0,01$ . Neste caso, o valor da umidade volumétrica obtida a Equação 4.2 é de 26,2 %. Este valor está 2,5 % acima do valor medido por TRICHES & PEDROSO (2002). Portanto, o uso da Equação 4.2 converge para o valor medido. Para este mesmo solo foram também empregados os índices de um solo argiloso, os índices propostos são:  $A = -7,18$ ;  $B = 1,74$ ;  $C = 0,27$ ;  $D = - 0,01$ . Utilizando novamente na equação o valor de  $\epsilon = 11,92$ , o valor da umidade volumétrica calculado foi igual a 31,3 %. Este valor está 7,6 % acima do valor da umidade volumétrica medida por TRICHES & PEDROSO (2002).

Estes resultados mostraram que os índices mais adequados para calcular o teor de umidade volumétrica de solo silte – argiloso foram os índices propostos para o solo siltoso. Empregando-se estes índices, o erro cometido foi de 2,5 %, que está no limite do erro tolerável, segundo a argumentação de TOPP et al. (1980), enquanto que a equação proposta para solo argiloso, quando empregado para calcular o teor de umidade de um solo siltoso, levou a um erro 5,1 % acima do limite admitido como tolerável.

ZEGELIN et al (1989) divulgaram resultados de ensaios e medida com amostras de um tipo de solo classificado como areia fina. Neste estudo dois desses resultados foram utilizados nas equações propostas. ZEGELIN et al. (1989) registraram que o valor da medida da constante dielétrica foi 3,75, quando o valor da umidade volumétrica medido foi 4,5 %. Outro valor medido de constante dielétrica foi  $\epsilon = 13,8$ , quando o valor da umidade volumétrica medido foi 28 %. Na verificação da equação geral, dois tipos de índices foram utilizados: i) índices para equação de solo arenoso, onde  $A = 13,87$ ;  $B = 5,8$ ;  $C = -0,33$ ;  $D = 0,01$ ; ii) índices para solo siltoso que já foram utilizados anteriormente.

Empregando-se na equação proposta os índices para solo arenoso, com o valor medido de constante dielétrica igual 3,75, o valor da umidade volumétrica calculado foi 2,9 %. Este valor é 1,6 % menor que o valor da umidade volumétrica medida. Utilizando-se o mesmo valor de constante dielétrica na equação proposta para um solo siltoso, o valor da umidade volumétrica calculado foi igual a 3,4 % . Este resultado é 1,1 % menor que o valor da umidade volumétrica medido. Empregando-se o valor da constante dielétrica igual a 13,8 na equação proposta para solo arenoso, o valor de umidade volumétrica calculada foi a igual 19 %. Este valor é 9% menor que o valor da umidade volumétrica calculado. Quando o mesmo valor de constante dielétrica igual a 13,8 foi utilizado na equação proposto para solo siltoso, o valor de umidade volumétrica calculado foi igual a 28,02 %. Este valor é 0,02 % maior que valor da umidade volumétrica calculado.

Os resultados mostram que os índices que apresentaram melhores resultados foram os índices propostos para solos siltosos. Empregando-os na Equação 4.2 os erros obtidos estiveram dentro dos limites toleráveis. O erro calculado foi  $\Delta \theta = 1,1 \%$  quando o teor de umidade volumétrica medido foi 4,5 %. O erro  $\theta = 0,02 \%$  ocorreu quando o teor de umidade volumétrica medido foi  $\theta = 28 \%$ . Também foi a equação que apresentou o valor de umidade volumétrica calculado mais próxima do valor da umidade volumétrica medido.

Os índices propostos para os vários tipos de solos apresentaram resultados muito interessantes, quando foram utilizados para calcular o teor de umidade volumétrica do solo, comparados com os resultados medidos. Os resultados mostraram que:

- a) na faixa de 0 a 5 % de teor de umidade volumétrica, as diferenças nos resultados obtidos são pequenas e toleráveis, quando são utilizadas as equações propostas;
- b) quando o teor de umidade volumétrica dos vários tipos de solos ( argiloso, siltoso e arenoso), está na faixa de 0 a 5 %, a utilização da equação de Topp et al. (1980) foi válida, porque o erro cometido na utilização dessa equação foi muito pequeno, situando – se na faixa dos 2,5 %, onde esse tipo de erro foi considerado tolerável;
- c) o resultado calculado, utilizando a Equação 4.2 ficou próximo do valor medido, quando o valor da umidade volumétrica foi maior que 10 %.

Tabela 4.14: Comparação dos valores de  $\theta$  obtidos por medição direta e pela utilização da Equação 4.2.

SOLO	REFERÊNCIA	COEFICIENTES							
		A	B	C	D	$\theta_{me}$	$\theta_{ca}$	$\Delta\theta$	E
LOESS SILTE- ARGILOSO	Rinaodi & Francisca (1999)	-17,02	6,58	-0,33	0,01	5	8,6	3,6	5
						39	39,6	0,6	22
ARGILO SILTOSO	Trichês & Pe- Droso (2002)	-17,02	6,58	-0,33	0,01	23,7	26,2	2,5	11,92
		-7,18	1,74	0,27	-0,01	23,7	31,3	7,6	11,92
AREIA FINA	Zeglin et al (1980)	-13,87	5,8	-0,39	0,01	4,5	2,9	-1,6	3,75
						28	19	-9	13,8
		-17,02	6,58	-0,33	0,01	28	28,02	0,02	13,8
						4,5	3,4	-1,1	3,75

$\theta_{me}$  – umidade volumétrica medida;

$\theta_{ca}$  – umidade volumétrica calculada;

$\Delta\theta$  – variação do teor de umidade (medida e calculada);

$\epsilon$  – constante dielétrica.

## CAPÍTULO V

### CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

#### 5.1 – CONCLUSÕES

Através da Técnica de TDR para determinar a constante dielétrica e o teor de umidade de cinco solos diferentes, pode-se concluir que:

1) A constante dielétrica dos vários tipos de solos utilizados neste estudo, quando secos, apresentou valores entre 2,93 e 3,65, resultando em uma variação de até 21%, entre esses valores;

2) Observou – se que para o mesmo teor de umidade, a constante dielétrica varia com o peso específico seco. Esta variação é mais suave que a variação do teor de umidade. Com teor de umidade de 15%, o solo arenoso apresentou com maior valor de peso específico e constante dielétrica mais elevada que os solos siltsos e solos argilosos;

3) Nos solos estudados, fatores como textura, porosidade e tipos de solos influenciaram nos valores da constante dielétrica e não puderam ser desprezados, visto que as alterações foram muito superiores a 2,5 %, valor considerado tolerável por TOPP *et al.* (1980);

4) Os solos Litossolo (argilo – siltoso), Podzólico Vermelho – Amarelo (argilo – arenoso) e Latossolo Vermelho – Amarelo ( areno – argiloso), foram tratados como uma família de solos, porque apresentaram propriedades idênticas em relação ao teor de umidade volumétrica e constante dielétrica, sendo toleráveis as diferenças nos valores da a constante dielétrica entre eles;

5) Verificou-se na medida da constante dielétrica do solo quando úmido, que, aquele que apresentou na sua constituição granulométrica maior porcentagem de areia em relação à

porcentagem de argila, apresentou no instante da medida, constante dielétrica com valor mais elevado;

6) O solo que apresentou na sua constituição granulométrica, maior porcentagem de argila em comparação à porcentagem de areia tende a possuir uma constante dielétrica com valor menor, em comparação com a constante dielétrica dos demais tipos de solos;

7) A constante dielétrica do solo Litólico (areno – siltoso), quando poluído com chorume, tornou-se até três vezes maior que a do solo natural, para um mesmo teor de umidade;

8) utilizando-se a equação proposta, o valor da umidade volumétrica estimado, ficou próximo do valor medido, com erro inferior a 2,5%, quando o teor de umidade volumétrica foi maior que 10%. Os melhores resultados foram obtidos utilizando-se os índices propostos para solos siltosos.

## 5.2 – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

1) Realizar novos ensaios com novas amostras de solos argilosos e arenosos, para determinar os valores de  $\gamma_d$ ,  $\theta$  e  $\epsilon$ ;

2) Produzir novas curvas de calibração para obtenção do teor de umidade volumétrica, por meio da constante dielétrica dessas novas amostras de solos;

3) Gerar novos valores para os coeficientes A, B, C e D, visando ampliar os dados de calibração para os novos solos estudados que constituírem famílias de solos (solos com propriedades idênticas);

4) Testar nas equações de correlação de  $\theta$  e  $\epsilon$ , desses novos solos, um número maior de dados da literatura, para verificar a validade e abrangência dessas equações;

5 – Realizar medições com instrumentos apropriados, para estudar e conhecer as propriedades e o comportamento dos minerais e colóides presentes nos solos argilosos (argilosos, siltosos e arenosos), que interferem no valor da constante dielétrica, dependendo das condições de umidade, textura, frequência da onda eletromagnética, temperatura, peso específico seco e índice de vazios.

SCHMUGGE (1983). Determinação da constante dielétrica relativa de um meio poros através de micro ondas (RDT). Artigo apresentado no XIX Encontro Nacional de Física da Matéria Condensada, Águas de Lindóia, SP 1996, pg 107-111.

TOMÉ JÚNIOR, J. B. Manual para interpretação de análise de solo. Guaíba: Agropecuária, 1997.

TOPP, G.C.; Davis, J.L. & Annan, A.N. Eletromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission line. Water Resource Research, 16 (03) 1980, pg 574 – 582.

TOPP, G.C.; Davis, J.L. Measurement of soil water content using time domain reflectometry (TDR): A Field Evaluation. Soil Science society Am. Journal. – Vol 49, 1985, pg. 19 – 24.

TORRE (1995). Estudo do colapso do solo através de prova de carga sobre placa instrumentado com tensiômetro e tomografia computadorizada. Tese apresentada a Escola de Engenharia de São Carlos para obtenção de título de Doutor. São Carlos SP, 1997.

VOGELER, I., CLTHIER, B.E., GREEN, S.R., TDR estimation of the resident concentration of electrolyte in the soil solution. Aust. J. Soil Res. 35, 1997 515 – 526.

TRICHÊS, G. & PEDROSO, R.S. Using time domain reflectometry to determine moisture contents in unsaturated soils. Proceedings of the third International Conference on Unsaturated Soils, Recife. 2002, pg. 357 a 361.

ZEGELIN, S.J.; White, I. & Jenkins, D.R. Improved field probes for soil water content and electrical conductivity measurements using time domain reflectometry. Water Resource Research, 25(11) 1989. Pg 2367 – 2376.

# ANEXO

## ANEXOS 1

Relação da Constante Dielétrica Relativa do Meio com a Distância Medida pelo TDR

$$v = \frac{2L}{t} \Rightarrow v = \frac{C}{\sqrt{\varepsilon}} \Rightarrow \frac{C}{\sqrt{\varepsilon}} = \frac{2L}{t} \Rightarrow 2L\sqrt{\varepsilon} = Ct \Rightarrow \sqrt{\varepsilon} = \frac{Ct}{2L}$$

$$(\sqrt{\varepsilon})^2 = \left(\frac{Ct}{2L}\right)^2 \Rightarrow \varepsilon = \left(\frac{Ct}{2L}\right)^2$$

$$C = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \cdot \mu_0}} \Rightarrow C = \frac{1}{\sqrt{\frac{\mu'}{\mu} \cdot \frac{\varepsilon'}{\varepsilon}}} \Rightarrow C = \frac{1}{\sqrt{\frac{\mu'}{\mu} \cdot \frac{\varepsilon'}{\varepsilon}}} \Rightarrow C = \frac{\sqrt{\mu \cdot \varepsilon}}{\sqrt{\mu' \cdot \varepsilon'}} \Rightarrow C = \frac{1}{\sqrt{\mu' \cdot \varepsilon'}} \cdot \sqrt{\mu \cdot \varepsilon}$$

$$\frac{1}{\sqrt{\mu' \cdot \varepsilon'}} = \text{velocidade} \rightarrow \text{de} \rightarrow \text{fase}$$

$$\mu \leq 1$$

$$C = v\sqrt{\mu \cdot \varepsilon} \Rightarrow C = v \cdot \sqrt{1 \cdot \varepsilon} \Rightarrow C = v\sqrt{\varepsilon}$$

$$v = \frac{\Delta S}{\Delta t} \Rightarrow \text{sen do} \rightarrow \Delta S = 2L$$

$$\text{Sendo: } \Delta t = t - t_0 \Rightarrow \text{sen do} \rightarrow t_0 = 0 \Rightarrow \Delta t = t$$

$$v = \frac{2L}{t} \Rightarrow v = \frac{C}{\sqrt{\varepsilon}}$$

v - velocidade (m/s)

L - comprimento da haste (m)

$\varepsilon$  - constante dielétrica relativa

C - velocidade da luz ( $3 \times 10^8$  m/s)

Relação entre Tempo de Propagação do Sinal e o Valor Apresentado pelo Cable Tester ( $S_{tdr}$ )

$$S_{tdr} = 0,5V_p Ct \Rightarrow Ct = \frac{S_{tdr}}{0,5V_p}$$