

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

**CARACTERIZAÇÃO ELETROMAGNÉTICA E
GEOTÉCNICA DE UM SOLO FINO DE BRASÍLIA**

GISELE GUIMARÃES RIBEIRO

ORIENTADOR: HERNÁN EDUARDO M. CARVAJAL
CO-ORIENTADOR: GREGÓRIO LUÍS SILVA ARAÚJO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM GEOTECNIA

PUBLICAÇÃO: G.DM-226/13

BRASÍLIA / DF: JUNHO / 2013

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

**CARACTERIZAÇÃO ELETROMAGNÉTICA E
GEOTÉCNICA DE UM SOLO FINO DE BRASÍLIA**

GISELE GUIMARÃES RIBEIRO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM GEOTECNIA.

APROVADA POR:

HERNÁN EDUARDO MARTÍNEZ CARVAJAL, D.Sc. (UnB)
(ORIENTADOR)

GREGÓRIO LUÍS SILVA ARAÚJO, D.Sc. (UnB)
(CO-ORIENTADOR)

NEWTON MOREIRA DE SOUZA, D.Sc. (UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)

SÉBASTIEN ROLAND MARIE JOSEPH RONDINEAU, Ph.D. (Solentech Ltda)
(EXAMINADOR EXTERNO)

DATA: BRASÍLIA/DF, 21 DE JUNHO DE 2013.

FICHA CATALOGRÁFICA

RIBEIRO, GISELE GUIMARÃES	
Caracterização eletromagnética e geotécnica de um solo fino de Brasília [Distrito Federal] 2013.	
xxiii, 71 p, 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Geotecnia, 2013)	
Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília.	
Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil.	
1.Argila	2.Constante dielétrica
3.Umidade volumétrica	4.Índice de vazios
I. ENC/FT/UnB	II. Título (Série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

RIBEIRO, G. G. (2013). Caracterização eletromagnética e geotécnica de um solo fino de Brasília. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-226/13, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 71 p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Gisele Guimarães Ribeiro

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: Caracterização eletromagnética e geotécnica de um solo fino de Brasília.

GRAU / ANO: Mestre / 2013

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta Dissertação de Mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta Dissertação de Mestrado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Gisele Guimarães Ribeiro
Rua 28 Norte, Lote 02, Apartamento 1003
CEP: 71917-720 – Águas Claras/DF – Brasil

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho, com todo amor, à minha família e ao meu noivo por me apoiarem em todas as minhas decisões e por me darem a força necessária para batalhar e seguir em frente sempre. Obrigada!

*“A mente que se abre a uma nova ideia
jamais voltará ao seu tamanho original.”*

Albert Einstein

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer a **Deus** por esta oportunidade e por ter colocado pessoas tão especiais na minha vida que me deram o equilíbrio emocional necessário para concluir este mestrado.

A minha mãe **Idilma** pelo apoio e dedicação incondicional de mãe. Nas horas mais difíceis ela sempre estava presente de alguma forma para me ajudar, seja de ouvinte/conselheira ou para fazer aquele lanchinho de mãe delicioso quando perdemos o horário de comer.

Ao meu pai (sócio da empresa Solentech) **Narcelio** que percorreu essa jornada junto comigo, me acompanhando nas viagens a trabalho para Porto Alegre, onde ele me ajudou a carregar os materiais e a realizar os ensaios necessários, me dando a oportunidade de conhecer um pouco mais de lá, sempre me oferecendo do bom e do melhor para que eu me sentisse o mais bem e confortável possível.

A minha irmã **Vanessa** que, do jeito dela, foi compreensiva comigo me dando espaço quando eu precisava. Pelas correções e dúvidas de inglês que eu sempre perguntava para ela até o último dia de entrega da dissertação, literalmente.

Ao meu noivo lindo **Francesco** que, mesmo de longe, sempre me fazia rir quando eu estava estressada e sempre esteve presente me ajudando a relaxar quando eu precisava. Obrigada pela compreensão, pelo companheirismo e pelo amor demonstrados durante essa longa caminhada. Você me complementa e foi por isso que te escolhi para estar do meu lado pro resto da vida!

Ao meu orientador e amigo, **Prof. Hernán**, pela parceria neste trabalho, pois era exatamente disso que eu precisava, um orientador que percorresse esse caminho junto comigo, me apoiando e me incentivando sempre. Obrigada pela oportunidade de trabalhar contigo, por amadurecer minha mente e por me fazer crescer como pessoa e como profissional. Essa combinação não poderia ter sido melhor!

Ao sócio da empresa Solentech, **Sébastien**, pelas transmissões de conhecimento sobre eletromagnetismo. Foram muitos dias de ensinamento para eu absorver pelo menos um pouquinho da sua sabedoria. Obrigada por toda a paciência, todas as dúvidas tiradas e pela ajuda fundamental nos experimentos feitos. Confesso que achei esta área muito interessante graças a você e eu sinto que progredi intelectualmente aprendendo todas essas coisas novas contigo.

Ao meu co-orientador, **Prof. Gregório**, pelo apoio administrativo no Laboratório de Geotecnia da UnB e nas minhas viagens a Porto Alegre, pelas correções e sugestões dadas para a minha dissertação e pelo acompanhamento de todo esse processo.

A todos os amigos da minha turma de mestrado, em especial, ao **Areosvaldo, Mariana, Igor, Ricardo, Flávia** que me acompanharam desde o início das atividades e, mais do que ninguém, me entenderam e me ajudaram durante esse percurso. O apoio moral e a amizade de vocês foram fundamentais.

Aos meus amigos de graduação e engenheiros civis, **Pedro, Latif, Ana Carolina, Luís Fernando, Ricardo, Isac, Fernando, Marcos, Júlia, Rodrigo, Húber, Lúcio e Isabela** que são meus amigos do peito e sempre me divertiam muito quando eu precisava me distrair. Obrigada pelo companheirismo de hoje e sempre.

As minhas amigas de Colégio Militar, **Déborah, Fernanda Araújo, Fernanda Virgílio, Gabriela, Heloísa e Luciana** que são amigas pra vida toda e que pude contar sempre que precisei conversar e me distrair.

Ao **Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília** por todo o apoio financeiro para as minhas viagens a trabalho e pelos conhecimentos da área geotécnica que adquiri ao longo do curso de mestrado. Desde a graduação que meu aprendizado na UnB vem aumentando constantemente e hoje me sinto uma engenheira civil mais competente graças a esta instituição. Obrigada a todos os professores do programa que contribuíram para meu crescimento intelectual e profissional como engenheira civil e, daqui a pouco, também como mestre em Geotecnia.

A empresa **Solentech** pela parceria feita com o Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da UnB, pela confiança depositada e pelo investimento na minha dissertação de mestrado. Essa parceria foi fundamental para o desenvolvimento deste trabalho. Obrigada por me acolherem muito bem em Porto Alegre sempre que fui lá e por me ajudarem em tudo que precisei durante a realização dos experimentos.

A **CAPES** e a **UnB** pelo apoio financeiro essencial.

Ao técnico **João** que me ajudou com o trabalho braçal de coleta das amostras e de peneiramento que eu, definitivamente, não teria conseguido ter feito sozinha.

Aos técnicos **Anderson e Flávio** do Laboratório de Geotecnia da UnB que me ajudaram com os ensaios de compactação e de determinação da massa específica dos grãos de solo.

Ao **Laboratório de Mecânica dos Solos da PUCRS** que disponibilizou salas, materiais e equipamentos necessários para a realização dos experimentos feitos em Porto Alegre.

RESUMO

Os métodos de investigação geotécnica, principalmente os métodos indiretos, têm evoluído bastante nas últimas décadas. A abundante energia eletromagnética tem sido aproveitada para aperfeiçoar alguns métodos geoeletricos já existentes. O *Time Domain Reflectometry* (TDR) e o *Ground Penetrating Radar* (GPR), por exemplo, são métodos geoeletricos não destrutivos muito comuns e muito utilizados na Geotecnia. Porém, as frequências usualmente utilizadas por estes métodos não são muito altas (abaixo de 2,00 GHz). Deste modo, suas resoluções são relativamente baixas, ou seja, o detalhamento das medições não é muito grande. Além disso, O TDR mede apenas a umidade volumétrica como parâmetro geotécnico e o GPR é usualmente empregado para detectar mudanças nas propriedades eletromagnéticas e seu uso é menos adequado para argilas, pois os sinais das ondas eletromagnéticas são atenuados e estas são mais expostas à absorção em superfícies argilosas.

Assim, nesta pesquisa, fizeram-se experimentos com amostras de argila coletadas em Brasília (Distrito Federal) para relacionar suas propriedades eletromagnéticas (constantes dielétricas) com seus parâmetros geotécnicos (umidades volumétricas e índices de vazios). As constantes dielétricas das amostras ($\epsilon_{\text{amostra}}$) foram obtidas convertendo-se os parâmetros-S medidos por um analisador de rede vetorial e aplicando-se a técnica de transmissão/reflexão com o uso de guias de onda retangulares onde as amostras foram inseridas. As frequências médias utilizadas para essas medições foram de 1,50 GHz, 10,00 GHz e 20,00 GHz (maiores ou iguais aos valores máximos de frequência utilizados pelo TDR e GPR). Os valores da umidade volumétrica e do índice de vazios de cada amostra foram adquiridos previamente em laboratório. As constantes dielétricas teóricas ($\epsilon_{\text{teórico}}$) foram calculadas mediante esses parâmetros geotécnicos, cujos valores foram substituídos em um modelo de mistura volumétrica (modelo de propagação do tempo - TP) para encontra-las. Então, os valores de $\epsilon_{\text{amostra}}$ e $\epsilon_{\text{teórico}}$ foram comparados entre si para cada par de valores de umidade volumétrica e de índice de vazios, assim como para cada frequência utilizada.

Os resultados comparados foram satisfatórios e, deste modo, foi possível iniciar a criação de um banco de dados para a porção de argila do solo no Brasil que associa diretamente a constante dielétrica deste material com parâmetros geotécnicos como umidade volumétrica e índice de vazios. E, a partir desses dois últimos, é possível obter praticamente todos os outros parâmetros geotécnicos.

ABSTRACT

Methods of geotechnical investigation, mainly indirect methods, have been evolving significantly in recent decades. The abundant electromagnetic energy has been harnessed to improve some existing geoelectrical methods. The Time Domain Reflectometry (TDR) and the Ground Penetrating Radar (GPR), for example, are non-destructive geoelectrical methods very common and widely used in Geotechnique. However, the frequencies commonly used by these methods are not very high (below 2,00 GHz). Thus, its resolutions are relatively low, that is, the detailings of the measurements are not very good. In addition, TDR measures only the volumetric water content as a geotechnical parameter and GPR is usually employed to detect changes in electromagnetic properties and its use is less suitable for clays because the signals of electromagnetic waves are attenuated and these waves are more exposed to absorption on clay surfaces.

Hence, in this research, experiments were made with clay samples collected in Brasilia (Distrito Federal) to relate their electromagnetic properties (dielectric constants) with their geotechnical parameters (volumetric water content and void ratio). The dielectric constants of the samples (ϵ_{sample}) were obtained by converting the S-parameters measured by a Vector Network Analyzer (VNA) and by applying the transmission/reflection technique with the use of rectangular waveguides where the samples were inserted. The medium frequencies used for the measurements were 1,50 GHz, 10,00 GHz and 20,00 GHz (greater than or equal to the maximum frequencies used by TDR and GPR). The values of volumetric water content and void ratio from each sample were previously acquired in the laboratory. The theoretical dielectric constants ($\epsilon_{\text{theoretical}}$) were calculated by these geotechnical parameters, whose values have been replaced in a volumetric mixture model (Time Propagation model – TP) to find $\epsilon_{\text{theoretical}}$. Then, the values of ϵ_{sample} and $\epsilon_{\text{theoretical}}$ were compared with each other for each pair of values of the volumetric water content and the void ratio, as well as for each frequency used.

The compared results were satisfactory and, thus, it was possible to start a database creation for the clay portion of the soil in Brazil that directly associates the dielectric constant of this material with geotechnical parameters such as volumetric water content and void ratio. And, from the latter two, it's possible to obtain practically all the other geotechnical parameters.

ÍNDICE

Capítulo	Página
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. MOTIVAÇÕES DA PESQUISA	2
1.2. OBJETIVOS	3
1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	4
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	5
2.1. INVESTIGAÇÕES GEOFÍSICAS	5
2.2. MÉTODOS GEOELÉTRICOS	5
2.2.1. TIME DOMAIN REFLECTOMETRY (TDR).....	7
2.2.2. GROUND PENETRATING RADAR (GPR).....	9
2.3. PROPRIEDADES ELETROMAGNÉTICAS	11
2.4. MEDIÇÃO DAS PROPRIEDADES ELETROMAGNÉTICAS.....	13
2.5. PARÂMETROS-S	14
2.5.1. PARÂMETROS-S PARA UMA REDE DE DUAS PORTAS.....	15
2.5.2. PROPRIEDADES DOS PARÂMETROS-S.....	16
2.6. TÉCNICA DE TRANSMISSÃO/REFLEXÃO.....	17
2.6.1. GUIAS DE ONDA	18
2.6.1.1. DIMENSÕES DE UMA GUIA DE ONDA RETANGULAR.....	18
2.6.2. CALIBRAÇÃO TRL E PARÂMETROS-S DO MUT.....	22
2.7. RELAÇÃO ENTRE CONSTANTE DIELÉTRICA E PARÂMETROS GEOTÉCNICOS.....	24
3. METODOLOGIA E MATERIAIS	30
3.1. COLETA DAS AMOSTRAS	30
3.2. PRÉ-CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA DO SOLO.....	32
3.2.1. PROCEDIMENTOS E SEPARAÇÃO DO SOLO	32
3.2.2. ENSAIO DE MASSA ESPECÍFICA DOS GRÃOS DO SOLO	34

3.2.3.	ENSAIO DE COMPACTAÇÃO	34
3.3.	CARACTERIZAÇÃO ELETROMAGNÉTICA DO SOLO.....	35
3.3.1.	CONSIDERAÇÕES FEITAS	36
3.3.2.	FREQUÊNCIAS E DIMENSÕES DAS GUIAS DE ONDA.....	36
3.3.3.	ENERGIA DE COMPACTAÇÃO E DEFINIÇÃO DO SOQUETE	38
3.3.4.	PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS.....	39
3.3.5.	CALIBRAÇÃO E MEDIÇÃO DOS PARÂMETROS-S DAS AMOSTRAS	45
3.3.6.	DETERMINAÇÃO DA CONSTANTE DIELÉTRICA E RELAÇÃO COM O ÍNDICE DE VAZIOS E A UMIDADE VOLUMÉTRICA DO SOLO	47
4.	RESULTADOS	50
4.1.	ENSAIOS DE MASSA ESPECÍFICA DOS GRÃOS E DE COMPACTAÇÃO	50
4.2.	COMPRIMENTO DAS GUIAS DE ONDA.....	52
4.3.	NÚMERO DE GOLPES EM CADA CAMADA DA COMPACTAÇÃO	53
4.4.	RESULTADOS OBTIDOS NA PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS	54
4.5.	PARÂMETROS-S DA CALIBRAÇÃO E DAS AMOSTRAS	56
4.6.	CARACTERIZAÇÃO ELETROMAGNÉTICA E GEOTÉCNICA DO SOLO	57
5.	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	61
6.	CONCLUSÕES E SUGESTÕES	65
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	67
7.	APÊNDICE.....	71

LISTA DE TABELAS

Tabela	Página
Tabela 2.1. Métodos eletromagnéticos (Modificado – Last et al., 2005).....	6
Tabela 2.2. Constantes dielétricas de materiais geológicos comuns medidas a 100 MHz (Modificado – Martinez & Byrnes, 2001).	13
Tabela 3.1. Frequências estabelecidas a serem utilizadas na caracterização eletromagnética.	36
Tabela 3.2. Dimensões transversais das guias de onda retangulares.	37
Tabela 3.3. Dimensões e posicionamentos do pino central nas transições.	37
Tabela 3.4. Teor de umidade desejado das amostras.	40
Tabela 4.1. Determinação da massa específica dos grãos do solo.	50
Tabela 4.2. Parâmetros geotécnicos obtidos no ensaio de compactação.	51
Tabela 4.3. Comprimento das guias de onda.	52
Tabela 4.4. Fatores de forma de cada guia de onda utilizada.	53
Tabela 4.5. Peso do soquete.	53
Tabela 4.6. Volume do molde.	54
Tabela 4.7. Energia de compactação, altura de queda do soquete e número de camadas. 54	
Tabela 4.8. Teores de umidade inicial e final.	54
Tabela 4.9. Volume interno das guias de onda e massa de solo necessária para cada guia de onda. 55	
Tabela 4.10. Massa total das amostras em cada guia de onda.	55
Tabela 4.11. Parâmetros-S da calibração – <i>Thru e Line</i>	56
Tabela 4.12. Parâmetros-S da calibração – <i>Reflect (Short e Open)</i>	56
Tabela 4.13. Parâmetros-S não calibrados das amostras.	57
Tabela 4.14. Massa e volume de cada componente das amostras.....	57
Tabela 4.15. Constante dielétrica utilizada para cada material.....	58

Tabela 4.16. Constante dielétrica teórica e das amostras.....	58
Tabela 4.17. Umidade volumétrica e índice de vazios teóricos e das amostras.....	58
Tabela 4.18. Frequência utilizada, teor de umidade final, umidade volumétrica, índice de vazios e constante dielétrica teórica e das amostras.....	59
Tabela A1. Dados de guias de onda retangular padrão (Pozar, 2003).	71

LISTA DE FIGURAS

Figura	Página
Figura 2.1. Princípio de medição de uma sonda TDR (Modificado – Ludwig et al., 2011).	8
Figura 2.2. Princípios de medição do GPR.	9
Figura 2.3. <i>Vector Network Analyzer</i> com faixa de frequência entre 300 kHz e 3.000 MHz.	14
Figura 2.4. Esquema dos parâmetros-S e da propagação das ondas eletromagnéticas em um VNA de duas portas (Modificado – Pereira, 2007).	16
Figura 2.5. Sistema de medição de um VNA com duas portas (técnica TR): (a) VNA conectado às transições da guia de onda e (b) MUT inserido numa guia de onda (Modificado – Fouché, 2006).	17
Figura 2.6. Estruturas típicas de guias de onda (Modificado – Orfanidis, 2010).	18
Figura 2.7. Guia de onda retangular.	18
Figura 2.8. Dimensões internas de uma guia de onda retangular.	19
Figura 2.9. Posicionamento do pino central na transição.	20
Figura 2.10. Calibração <i>Thru</i> com duas transições.	22
Figura 2.11. Calibração <i>Reflect</i> com apenas uma transição: (a) calibração <i>Open</i> com uma extremidade aberta e (b) calibração <i>Short</i> com uma placa metálica em seu extremo.	23
Figura 2.12. Calibração <i>Line</i> com uma guia de onda posicionada entre duas transições.	23
Figura 2.13. Configuração das matrizes-T (Modificado – Whites, 2012).	24
Figura 2.14. Amostras de areia: (a) constante dielétrica <i>versus</i> porosidade e (b) constante dielétrica <i>versus</i> frequência (Modificado – Knoll, 1996).	26
Figura 2.15. Amostras de argila: (a) constante dielétrica <i>versus</i> porosidade e (b) constante dielétrica <i>versus</i> frequência (Modificado – Knoll, 1996).	27
Figura 2.16. Amostras de areia e argila: (a) constante dielétrica <i>versus</i> porosidade e (b) constante dielétrica <i>versus</i> frequência (Modificado – Knoll, 1996).	27

Figura 2.17. Constante dielétrica <i>versus</i> grau de saturação: (a) amostras de areia argilosa e (b) amostras de argila arenosa (Modificado – Knoll, 1996).....	27
Figura 3.1. Coleta de amostras deformadas no campo experimental de Geotecnia da UnB: (a) escavação do técnico com a picareta e (b) amostras coletadas.	30
Figura 3.2. Local da coleta de amostras: (a) localização em relação ao prédio SG-12 e OBSIS e (b) aproximação e detalhes do local da escavação.	31
Figura 3.3. Preparação para obter a porção de argila do solo: (a) secagem, (b) destorroamento e (c) peneiramento na peneira N° 200.	33
Figura 3.4. Corpos de prova após o ensaio de compactação com cilindro pequeno....	35
Figura 3.5. PUCRS, campus Viamão.....	35
Figura 3.6. Dimensões atribuídas ao soquete da guia de onda 1.	38
Figura 3.7. Solo utilizado para a caracterização eletromagnética (sacos 1, 2 e 3).....	40
Figura 3.8. Balança utilizada para a determinação do teor de umidade inicial e final dos sacos. 40	
Figura 3.9. Preparação das amostras antes da caracterização eletromagnética.....	41
Figura 3.10. Balança utilizada na preparação das amostras e das guias de onda.....	41
Figura 3.11. Paredes de plástico da guia de onda 1.	42
Figura 3.12. Etapas da compactação das amostras na guia de onda 1: (a) primeira camada compactada, (b) segunda camada compactada e (c) terceira camada compactada, regulada e contida pela parede de plástico.....	44
Figura 3.13. Preparação das amostras na guia de onda 2: (a) guia de onda 2 aberta com as duas paredes de plástico e (b) amostra dentro da guia de onda 2 fechada.....	44
Figura 3.14. Preparação das amostras na guia de onda 3: (a) guia de onda 3 aberta com as duas paredes de plástico e (b) amostra dentro da guia de onda 3 fechada.....	45
Figura 3.15. Guias de onda preenchidas com as amostras e encaixadas entre as transições: (a) guia de onda 1 e (b) guias de onda 2 e 3.	46
Figura 3.16. Cabos coaxiais que conectam as transições com o VNA.	47
Figura 4.1. Curva de saturação e de compactação da porção de argila do solo coletado.	

Figura 4.2. Gráfico da constante dielétrica <i>versus</i> a frequência utilizada para amostras de argila com diferentes teores de umidade.	59
Figura 4.3. Gráfico 3-D: constante dielétrica das amostras <i>versus</i> índice de vazios das amostras <i>versus</i> umidade volumétrica.	60
Figura 4.4. Gráfico 3-D: constante dielétrica teórica <i>versus</i> índice de vazios das amostras <i>versus</i> umidade volumétrica.	60
Figura 5.1. Pino central nas transições: (a) da guia de onda 1, (b) da guia de onda 2 e (c) da guia de onda 3.	62

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURAS E ABREVIACÕES

a	Maior lado da dimensão transversal de uma guia de onda retangular
A	Amplitude dos parâmetros-S
AMT	Audio Magneto-Tellurics
ASTM	American Society for Testing and Materials
b	Menor lado da dimensão transversal de uma guia de onda retangular
c	Velocidade da luz no vácuo
cm	Centímetro
cm ³	Centímetro cúbico
CSAMT	Controlled Source Audio Magneto-Tellurics
d	Distância da antena até o refletor
d ₁	Diâmetro da cabeça do pino central
d ₂	Diâmetro do pino central
d ₃	Distância entre o eixo central até a parede lateral mais próxima
dB	Decibel
e	Índice de vazios
e _{amostra}	Índice de vazios da amostra
e _{teórico}	Índice de vazios teórico
e _{teór. máx.}	Índice de vazios teórico máximo
e _{teór. mín.}	Índice de vazios teórico mínimo
E	Energia de compactação por unidade de volume
EDG	Electrical Density Gauge
EIA	Electronic Industries Alliance
EM	Eletromagnético
EOF	Electrical Offset Logging
f	Frequência media escolhida

F	Faraday
F_1	Fator de forma que relaciona o diâmetro do pino central com o diâmetro da cabeça do pino
F_2	Fator de forma que relaciona a distância entre a extremidade do pino central até a borda da parede lateral com a dimensão interna “b” da transição
F_3	Fator de forma que relaciona o diâmetro do pino central com seu comprimento a partir da parte interna da parede lateral
f_c	Frequência central
FDEM	Frequency Domain Electromagnetic
g	Grama
GHz	Gigahertz
GPR	Ground Penetrating Radar
H	Henry
HLEM	Horizontal Loop Electromagnetic
HP	Hewlett Packard
Hz	Hertz
$j = \sqrt{-1}$	Unidade imaginária
kg	kilograma
kHz	Kilohertz
kN	Kilonewton
L	Comprimento de uma guia de onda retangular
L_1	Distância entre o eixo central do pino até a abertura da transição
L_2	Comprimento do pino central, a partir da parte interna da parede lateral
m	Metro
M_1	Massa do solo úmido
M_2	Massa do picnômetro + solo + água, na temperatura T de ensaio
M_3	Massa do picnômetro cheio de água até a marca de referência, na

	temperatura T de ensaio
m^3	Metro cúbico
m_{ar}	Massa de ar da amostra
M_h	Massa úmida do solo compactado
MHz	Megahertz
mm	Milímetros
m_n	Massa de solo necessária em cada guia de onda
m_s	Massa de sólidos da amostra
m_t	Massa total da amostra
MUT	Material Under Test
m_w	Massa de água da amostra
n	Número da porta do VNA variando de 1 a “N”
N	Quantidade de portas de um VNA
NBR	Norma Brasileira Registrada
ns	Nanossegundo
OBSIS	Observatório Sismológico da UnB
PUCRS	Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul
Q_w	Distância entre o eixo central do pino até a parede de fundo da transição
S	Grau de saturação
S_{11}	Fração de V_1^+ refletida na porta 1 de um VNA com duas portas
S_{12}	Fração de V_2^+ transmitida na porta 2 de um VNA com duas portas
S_{21}	Fração de V_1^+ transmitida na porta 1 de um VNA com duas portas
S_{22}	Fração de V_2^+ refletida na porta 2 de um VNA com duas portas
S_{ij}	Elemento específico da matriz dos parâmetros-S
SOLENTech	Solution, Engineering & Technology
TDEM	Time Domain Electromagnetic
TDR	Time Domain Reflectometry

TE	Transverse Electric
TP	Time Propagation
TR	Transmissão/Reflexão
TRL	Thru – Reflect – Line
t_v	Tempo de viagem de ida e volta das ondas eletromagnéticas refletidas
UnB	Universidade de Brasília
v	Velocidade na qual as ondas eletromagnéticas viajam através do material
V	Voltagem
V_{ar}	Volume de ar da amostra
V_c	Volume útil do molde cilíndrico de compactação
$V_g = V_t$	Volume interno da guia de onda = Volume total da amostra
V_i	Fração de volume do i-ésimo componente de uma amostra
VLF	Very Low Frequency
V_1^-	Voltagem que sai na porta 1 de um VNA com duas portas
V_1^+	Voltagem que entra na porta 1 de um VNA com duas portas
V_2^-	Voltagem que sai na porta 2 de um VNA com duas portas
V_2^+	Voltagem que entra na porta 2 de um VNA com duas portas
$V_n^- = V_i^-$	Voltagem da onda refletida/transmitida na porta “n” ou “i”
$V_n^+ = V_j^+$	Voltagem da onda incidente na porta “n” ou “j”
VNA	Vector Network Analyzer
V_s	Volume de sólidos da amostra
V_w	Volume de água da amostra
w	Teor de umidade após a compactação
w_a	Teor de umidade arbitrado
w_d	Teor de umidade desejado
w_f	Teor de umidade final da amostra

w_h	Umidade higroscópica antes da compactação
w_i	Umidade inicial da amostra
WR	Waveguide Rectangular
°	Graus
°C	Graus Celsius
[S]	Matriz dos parâmetros-S
[S] _A	Matriz de erro da transição 1
[S] _B	Matriz de erro da transição 2
[S] _L	Matriz de parâmetros-S da calibração Line
[S] _M	Matriz não calibrada de parâmetros-S do MUT
[S] _{MUT}	Matriz calibrada de parâmetros-S do MUT
[S] _R	Matriz de parâmetros-S da calibração Reflect
[S] _T	Matriz de parâmetros-S da calibração Thru
[T] _A	Matriz-T de erro da transição 1
[T] _B	Matriz-T de erro da transição 2
[T] _M	Matriz-T não calibrada do MUT
[T] _{MUT}	Matriz-T calibrada do MUT
[V ⁻]	Matriz coluna das voltagens das ondas refletidas/transmitidas
[V ⁺]	Matriz coluna das voltagens das ondas incidentes
α	Fator geométrico que relaciona a direção da camada efetiva dos componentes de uma amostra com a direção do campo elétrico aplicado
ϵ	Permissividade elétrica
ϵ_0	Permissividade elétrica do vácuo
$\epsilon_{amostra}$	Constante dielétrica da amostra
ϵ_{ar}	Constante dielétrica do ar
$\epsilon_{arg.}$	Constante dielétrica da argila seca
$\epsilon_{arg. máx.}$	Constante dielétrica máxima da argila seca

$\epsilon_{\text{arg. m\u00edn.}}$	Constante diel\u00e9trica m\u00ednima da argila seca
ϵ_i	Constante diel\u00e9trica do i-\u00e9simo componente de uma amostra
ϵ_r	Permissividade el\u00e9trica relativa ou constante diel\u00e9trica
ϵ'_r	Parte real da permissividade el\u00e9trica relativa
ϵ''_r	Parte imagin\u00e1ria da permissividade el\u00e9trica relativa
ϵ_s	Constante diel\u00e9trica do mineral s\u00f3lido
$\epsilon_{\text{te\u00f3r. m\u00e1x.}}$	Constante diel\u00e9trica te\u00f3rica m\u00e1xima
$\epsilon_{\text{te\u00f3r. m\u00edn.}}$	Constante diel\u00e9trica te\u00f3rica m\u00ednima
$\epsilon_{\text{te\u00f3rica}}$	Constante diel\u00e9trica te\u00f3rica
ϵ_w	Constante diel\u00e9trica da \u00e1gua
η	Porosidade
θ	Fase dos par\u00e2metros-S
θ_v	Umidade volum\u00e9trica
λ	Comprimento de onda no espa\u00e7o livre
λ_c	Comprimento de onda de corte
λ_g	Comprimento de onda guiado
μ	Permeabilidade magn\u00e9tica
μ_0	Permeabilidade magn\u00e9tica do v\u00e1cuo
μ_r	Permeabilidade magn\u00e9tica relativa
μ'_r	Parte real da permeabilidade magn\u00e9tica relativa
μ''_r	Parte imagin\u00e1ria da permeabilidade magn\u00e9tica relativa
π	N\u00famero pi
$\rho_{\text{a\u00e7o}}$	Massa espec\u00edfica do a\u00e7o
ρ_d	Massa espec\u00edfica aparente seca
ρ_s	Massa espec\u00edfica dos gr\u00e3os do solo
ρ_T	Massa espec\u00edfica da \u00e1gua na temperatura T de ensaio

ρ_w	Massa específica da água
σ	Condutividade elétrica
ϕ	Diâmetro
Ω	Ohm

1. INTRODUÇÃO

Na Geotecnia os estudos das propriedades mecânicas dos solos e das rochas são feitos a partir de caracterizações geológico-geotécnicas. De acordo com Brito & Oliveira (1998), é muito importante que, desde o início das atividades, já estejam bem definidas as principais características geológicas da área para orientar o projeto segundo as aptidões naturais do local propiciando a elaboração de um empreendimento harmônico com a natureza do terreno, econômico e seguro. Além disso, com a descrição do solo, podem-se identificar áreas de contaminação e prevenir possíveis problemas ambientais na região. As principais ferramentas utilizadas com estes objetivos são o sensoriamento remoto, o mapeamento geológico, os ensaios geofísicos e as sondagens mecânicas.

Segundo Brito & Oliveira (1998), as escavações realizadas com o intuito de prospectar os maciços, as sondagens mecânicas e os ensaios compreendem os métodos diretos. Em geral, os ensaios geofísicos e o sensoriamento remoto são chamados de métodos indiretos de investigação, utilizando-se as feições topográficas, as morfológicas e as propriedades físicas do terreno, para determinar, indiretamente, a distribuição e o posicionamento dos corpos geológicos e suas características físicas e tecnológicas. Os principais métodos geofísicos utilizados na Geologia de Engenharia são: sísmicos, geoeletricos e potenciais. A maioria desses métodos desenvolveu-se a partir da indústria do petróleo e da prospecção mineral, recebendo adaptações na Geologia de Engenharia, principalmente para garantir maior portabilidade dos equipamentos e aumento da resolução.

Como consequência do desenvolvimento da aquisição digital de dados e de programas computacionais para tratamento das informações coletadas, ocorreu um natural avanço na aplicação dos métodos de investigação para solução de problemas geológico-geotécnicos. Dentre as novas abordagens da investigação geológico-geotécnica destacam-se os métodos geoeletricos que se utilizam da abundante energia eletromagnética para caracterizar e distinguir os diferentes materiais geológicos. O Radar de Penetração no Solo (GPR – *Ground Penetrating Radar*), por exemplo, é um método geoeletrico recente que, por meio de antenas, emite ondas eletromagnéticas e recebe os sinais refletidos nas estruturas ou nas interfaces em subsuperfície (Brito & Oliveira, 1998). O TDR (*Time Domain Reflectometry*) é uma técnica não destrutiva baseada na propagação de ondas eletromagnéticas para medições rápidas, confiáveis e rotineiras de umidade volumétrica e condutividade elétrica do solo (Mojid & Cho, 2004).

Os métodos geoeletricos que se utilizam da energia eletromagnética vêm apresentando uma grande evolução tecnológica na área de instrumentação geotécnica, pois estes métodos fornecem como resultado propriedades eletromagnéticas do solo que podem se relacionar com parâmetros geotécnicos do solo (Sabouroux & Ba, 2011).

1.1. MOTIVAÇÕES DA PESQUISA

Recentemente, os métodos geofísicos revolucionaram a investigação geotécnica, devido ao avanço da tecnologia. O GPR e o TDR são um dos métodos mais modernos e utilizam a energia eletromagnética para determinar propriedades eletromagnéticas (condutividade elétrica, permissividade elétrica e permeabilidade magnética) dos materiais do subsolo. Segundo Martinez & Byrnes (2001), a constante dielétrica do material (permissividade elétrica relativa) pode ser convertida em propriedades geotécnicas de acordo com um modelo de mistura volumétrica dado por Lichtenecker-Rother (1937).

Neste trabalho, será definido como argila o solo fino que passa na peneira Nº 200 (com diâmetro de abertura de 0,075 mm) com um índice de plasticidade maior ou igual a 4%, segundo a ASTM 2488 (2009).

Desta forma, esta pesquisa visa realizar experimentos controlados com um tipo de solo fino (argila) em laboratório, utilizando-se um analisador de rede vetorial (VNA – *Vector Network Analyzer*) para medir parâmetros-S das amostras e convertê-los em constantes dielétricas através de análise computacional, controlando-se os parâmetros geotécnicos das amostras para comparar os valores obtidos em laboratório com os resultados obtidos pelo modelo de propagação do tempo (modelo TP), modelo volumétrico utilizado.

As motivações desta pesquisa apoiam-se na dificuldade da caracterização geotécnica do solo (como no caso de rodovias, onde ensaios destrutivos podem gerar atrasos no cronograma da obra), principalmente por métodos diretos, e na intenção de empregar resoluções maiores do que as obtidas pelo GPR e pelo TDR, utilizando-se assim frequências maiores do que as adotadas por estes métodos. Além disso, o TDR mede apenas a umidade volumétrica como parâmetro geotécnico e o GPR é usualmente empregado para detectar mudanças nas propriedades eletromagnéticas e seu uso é menos adequado para argilas, pois os sinais das ondas eletromagnéticas são atenuados e estas são mais expostas à absorção em superfícies argilosas. Outros estímulos para este trabalho baseiam-se na relação direta que se pode obter entre propriedades eletromagnéticas e geotécnicas do solo e no fato de que não foi encontrado nenhum estudo de Geotecnia deste cunho feito com argila de solo brasileiro, de

modo que, até onde foi pesquisado, não foi constatado nenhum banco de dados no Brasil sobre a relação entre as propriedades eletromagnéticas e os parâmetros geotécnicos desse tipo de solo para as frequências utilizadas nesta pesquisa.

1.2. OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é dar início à criação de um banco de dados brasileiro da porção de argila do solo de Brasília que associa diretamente a constante dielétrica deste material com parâmetros geotécnicos como índice de vazios e umidade volumétrica, utilizando-se a técnica de transmissão/reflexão (com frequências maiores do que as utilizadas pelo GPR e TDR) para a medição dos parâmetros-S das amostras de solo e um sistema de análise computacional para convertê-los em propriedades eletromagnéticas.

De modo a complementar tal meta, os objetivos específicos desta pesquisa consistem em:

- Pré-caracterizar o material sob teste (MUT – *Material Under Test*) quanto às suas propriedades geotécnicas realizando-se ensaios de compactação e de determinação da massa específica dos grãos do solo em laboratório;
- Preparar as amostras para a medição de suas propriedades eletromagnéticas obtendo-se a quantidade de massa e volume de cada componente (água, ar e argila) para encontrar parâmetros geotécnicos como a umidade volumétrica e o índice de vazios das amostras através de algumas equações e informações geotécnicas;
- Calibrar o VNA e caracterizar as amostras quanto às suas propriedades eletromagnéticas (constantes dielétricas) por meio de medições feitas utilizando-se um VNA e guias de onda retangulares;
- Utilizar as equações dadas por Lichtenecker-Rother (1937) e Sabouroux & Ba (2011) para encontrar os valores teóricos das constantes dielétricas e dos índices de vazios das amostras;
- Iniciar a criação de um banco de dados que associa o resultado de uma constante dielétrica com índice de vazios e umidade volumétrica da argila.

1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A estrutura desta dissertação é dividida em sete capítulos.

O primeiro capítulo trata da abordagem geral do assunto e relata sobre o constante desenvolvimento tecnológico das investigações geotécnicas, principalmente dos métodos que utilizam da energia eletromagnética para caracterizar o solo geotecnicamente. Além disso, este capítulo expõe as motivações e os objetivos da pesquisa.

O segundo capítulo faz uma revisão da bibliografia encontrada sobre investigações geotécnicas em geral, dando ênfase aos dois métodos geoeletricos mais comuns (GPR e TDR). Também descreve sobre as propriedades eletromagnéticas, como obtê-las e como relacioná-las com parâmetros geotécnicos através do modelo de mistura volumétrica.

O terceiro capítulo mostra a metodologia de preparação das amostras utilizadas no trabalho e os materiais utilizados. A metodologia foi baseada na preparação das amostras da argila coletada e por ensaios realizados para caracterizar estes materiais quanto aos seus parâmetros geotécnicos e quanto às suas constantes dielétricas.

O quarto capítulo apresenta os resultados obtidos após a metodologia empregada: curvas de compactação e de saturação da argila utilizada; valores dos parâmetros-S obtidos no VNA; valores de umidade volumétrica, índice de vazios e constante dielétrica de cada amostra, bem como os valores obtidos pelas equações teóricas do modelo TP; e gráficos bidimensionais (relacionando-se a frequência utilizada com as constantes dielétricas) e tridimensionais (relacionando-se a umidade volumétrica e o índice de vazios das amostras com as constantes dielétricas obtidas).

O quinto capítulo faz uma análise e discussão dos resultados obtidos no capítulo quatro.

O sexto capítulo apresenta as conclusões finais dos resultados obtidos neste trabalho e aponta algumas sugestões para pesquisas futuras que poderão ser realizadas nessa área de estudo.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. INVESTIGAÇÕES GEOFÍSICAS

Segundo Brito & Oliveira (1998), os métodos geofísicos permitem determinar a distribuição, em profundidade, de parâmetros físicos dos maciços, tais como velocidade de propagação de ondas acústicas, resistividade elétrica, contrastes de densidade e campo magnético da Terra.

Os principais métodos geofísicos utilizados na Geologia de Engenharia são:

- Métodos geoeletricos: eletrorresistividade (sondagem elétrica vertical e caminhamento elétrico), polarização induzida, potencial espontâneo, eletromagnéticos (Domínio do Tempo - EM, *Very Low Frequency* (VLF), Radar de Penetração no Solo (GPR)).
- Métodos sísmicos: refração, reflexão, ensaios entre furos (*crosshole* e tomografia sísmica), utilizados na superfície terrestre, e perfilagem sísmica contínua, sonografia e ecobatimetria, utilizados na investigação de áreas submersas (rio, lago e mar).
- Métodos Potenciais: magnetometria e gravimetria.

2.2. MÉTODOS GEOELÉTRICOS

Segundo Brito & Oliveira (1998), a investigação geofísica utilizando métodos geoeletricos (inclui-se nestes métodos, os elétricos e magnéticos) envolve a detecção, na superfície dos terrenos, dos efeitos produzidos pelo fluxo de corrente elétrica em subsuperfície. Com os métodos geoeletricos é possível medir correntes eletromagnéticas, diferenças de potenciais e/ou campos eletromagnéticos em pontos da superfície ou dentro de um volume a ser investigado. Os métodos geoeletricos, em geral, são amplamente empregados para:

- Determinação da posição e geometria do topo rochoso;
- Caracterização de estratos sedimentares;
- Identificação de zonas de falhas, zonas alteradas e/ou fraturadas, contatos litológicos, cavidades e diques;
- Caracterização de materiais impermeáveis e permeáveis, o que permite delimitar zonas potenciais de contaminação;

- Localização de corpos condutores e corpos resistentes;
- Identificação do nível de água;
- Identificação da direção e sentido do fluxo dos fluidos subsuperficiais.

Os métodos geoeletricos que se utilizam da energia eletromagnética podem ser divididos de acordo com a Tab. 2.1 abaixo.

Tabela 2.1. Métodos eletromagnéticos (Modificado – Last et al., 2005).

Métodos eletromagnéticos		
Eletromagnéticos (EM)	Domínio do Tempo EM (TDEM)	<i>Time Domain Reflectometry</i> (TDR)
	Domínio da Frequência EM (FDEM)	Condutividade do terreno
		<i>Horizontal Loop EM</i> (HLEM)
		<i>Very Low Frequency</i> (VLF EM)
		Indução EM e Detectores de Metal EM
		Magneto-telúricos (Natural [AMT] e Fonte Controlada [CSAMT])
	<i>Electrical Offset Logging</i> (EOF)	
	Radار de Penetração no Solo (GPR)	Superfície
	Tomografia de radar <i>cross-borehole</i>	

Notas: AMT: *Audio Magneto-tellurics*

CSAMT: *Controlled Source Audio Magneto-tellurics*

FDEM: *Frequency Domain Electromagnetic*

TDEM: *Time Domain Electromagnetic*

O objetivo de uma investigação geofísica é obter informações sobre a distribuição espacial interior de uma ou mais propriedades físicas do solo, a partir de um número limitado de medições feitas na superfície da terra ou em outro local acessível (Nabighian, 1991). As propriedades dielétricas dos materiais têm recebido maior atenção junto com o uso de ondas eletromagnéticas nas investigações de avaliação estrutural e do material. As propriedades dielétricas dos materiais se correlacionam com outras características do material e podem ser utilizadas para determinar propriedades como o teor de umidade, o peso específico natural, o conteúdo biológico, a concentração química e a relação tensão-deformação. Tal conhecimento pode ser utilizado para pesquisa e aplicação em ciência dos alimentos, medicina, biologia, agricultura, química, equipamentos elétricos, indústria de defesa (segurança), e engenharia (Büyükoztürk et al., 2006).

Na área de engenharia civil, nas últimas duas décadas, realizaram-se avanços substanciais na medição do teor de umidade e da condutividade elétrica do solo com a utilização do *Time Domain Reflectometry* (TDR) (Robinson et al., 2003). O *Ground Penetrating Radar* (GPR) também é um método de investigação que está crescendo rapidamente na engenharia geotécnica e teve um tremendo progresso nos últimos vinte anos (Jol, 2009). O GPR detecta mudanças nas propriedades eletromagnéticas (permissividade elétrica, condutividade elétrica e permeabilidade magnética) que, numa configuração geológica, são função do material do solo, do teor de umidade e do peso específico natural (ASTM D6432, 2011). Segundo Meehan & Hertz (2011), uma alternativa relativamente nova é o EDG (*Electrical Density Gauge*) que usa uma série de medições elétricas junto com modelos de solo calibrados para deduzir *in-situ* a densidade do solo e o seu teor de umidade. Eles realizaram um estudo experimental para avaliar a acurácia do EDG, mas os resultados obtidos não tiveram boa concordância com os valores reais esperados. Por ser um método muito novo e devido a pouca confiabilidade dada ao EDG, esta pesquisa irá ressaltar apenas os métodos do GPR e do TDR que são os mais comuns e mais utilizados na Geotecnia.

2.2.1. TIME DOMAIN REFLECTOMETRY (TDR)

O TDR é um método alternativo não destrutivo que foi desenvolvido por Davis & Chudobiak, em 1975 (Noborio, 2001) para medir teor de umidade do solo. Segundo Ludwig et al. (2011), na ciência dos solos o TDR é um método moderno que é utilizado para medição do teor de umidade volumétrica e da condutividade elétrica dos solos. A medição é baseada na análise da velocidade de propagação de ondas eletromagnéticas guiadas ao longo de uma sonda TDR através do solo. Ele permite determinar as propriedades dielétricas do meio que estão estreitamente relacionadas com a umidade volumétrica e com a condutividade elétrica. Na Fig. 2.1 abaixo se encontra um desenho esquemático da medição que consiste em um dispositivo TDR que é composto de um gerador de sinal e uma unidade amostral, e uma sonda TDR que é conectada ao dispositivo TDR via cabo coaxial.

O princípio de medição é baseado na medição da velocidade de propagação de um pulso de voltagem dado em etapa ao longo da sonda TDR através do solo. A sonda é instalada de maneira que as hastes de metal estejam completamente cercadas pelo solo. O dispositivo TDR gera pulsos eletromagnéticos curtos (faixa de frequência operante entre 20 kHz e 1,5 GHz) que propagam ao longo do cabo coaxial e mais adiante ao longo das hastes da sonda TDR. Em locais onde ocorrem mudanças na permissividade elétrica relativa, parte

da energia eletromagnética é refletida. Por exemplo, na cabeça da sonda TDR, parte da energia eletromagnética é refletida devido ao salto da impedância entre o cabo e o material da cabeça da sonda. A fração remanescente do sinal propaga através do solo ao longo das hastes de metal que serve de guia de onda. Em posições onde as propriedades dielétricas do solo mudam erraticamente, o sinal é novamente parcialmente refletido. Em solos com baixa condutividade elétrica a parte remanescente da energia eletromagnética é finalmente refletida no final das hastes da sonda. O desenvolvimento temporal da voltagem do sinal do TDR refletido é gravado pelo detector de sinal do dispositivo TDR. A Fig. 2.1 mostra um diagrama característico de voltagem-tempo como o que é obtido em uma medição do TDR. A partir da resposta do sinal podem-se deduzir as propriedades elétricas do material através do qual o pulso eletromagnético propaga (Ludwig et al., 2011).

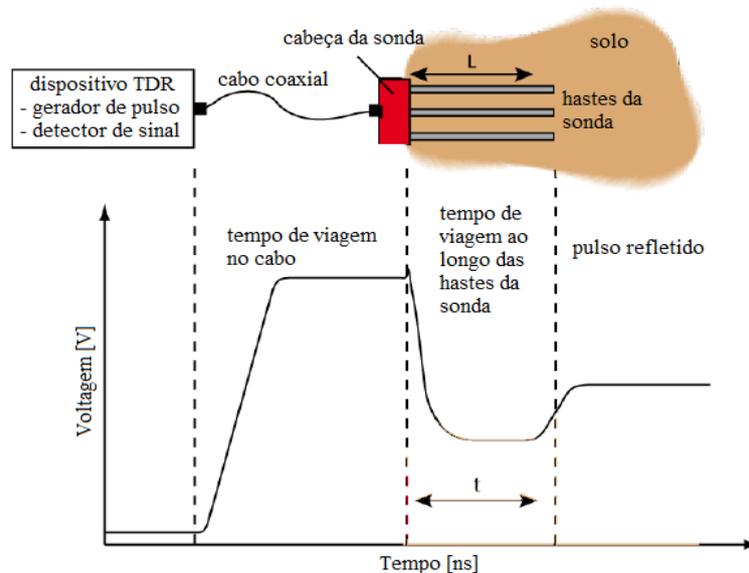


Figura 2.1. Princípio de medição de uma sonda TDR (Modificado – Ludwig et al., 2011).

De acordo com Blonquist et al. (2005), em muitas aplicações de gerenciamento de água a tecnologia do sensor de teor de umidade, como o TDR, pode melhorar significativamente a eficiência da obtenção da umidade, devido à rapidez do processo de medição. O TDR não é a solução para todos os problemas de sensoriamento de teor de umidade volumétrica do solo, mas tem a vantagem de ser *in-situ* e em tempo real. Outra vantagem é que o TDR pode determinar simultaneamente a umidade volumétrica e a condutividade elétrica com uma única sonda. Porém, dentro dos últimos anos, tem havido uma série de tentativas de resolver alguns problemas do TDR e o conceito de projeto de um sensor autônomo de custo baixo, de tamanho pequeno, alta acurácia e precisão na

determinação da permissividade elétrica que envolva um volume de amostragem representativo não foi concedido com a tecnologia do TDR.

2.2.2. GROUND PENETRATING RADAR (GPR)

Segundo Nashait & Seger (2011), o GPR é um método geofísico que tem sido utilizado amplamente para mapear o subsolo em escalas de quilômetros a centímetros. Este método é baseado na propagação de ondas eletromagnéticas de alta frequência (que opera de 10 MHz a 2 GHz) e retrata estruturas no solo que estão relacionadas a mudanças nas propriedades dielétricas.

O GPR é uma técnica muito versátil e, desde a década de 90 até os dias atuais, tem sido empregado na engenharia geotécnica e ambiental, mineração, ciência forense e arqueologia, localização de tubos e cabos subterrâneos, investigação de estruturas de concreto e pavimentação, aplicações militares e de segurança, agricultura, silvicultura e glaciologia (Sensors & Software, 2013). De acordo com Knight (2001), na Geotecnia, as imagens do GPR são interpretadas para obter modelos de grande escala da arquitetura subterrânea e para auxiliar na estimativa de propriedades hidrogeológicas como teor de umidade, porosidade e permeabilidade. Sua capacidade não invasiva faz do GPR uma alternativa atraente para os métodos tradicionais utilizados para caracterização do subsolo. O sistema de GPR padrão consiste em uma antena transmissora e outra receptora, conforme ilustrado na Fig. 2.2.

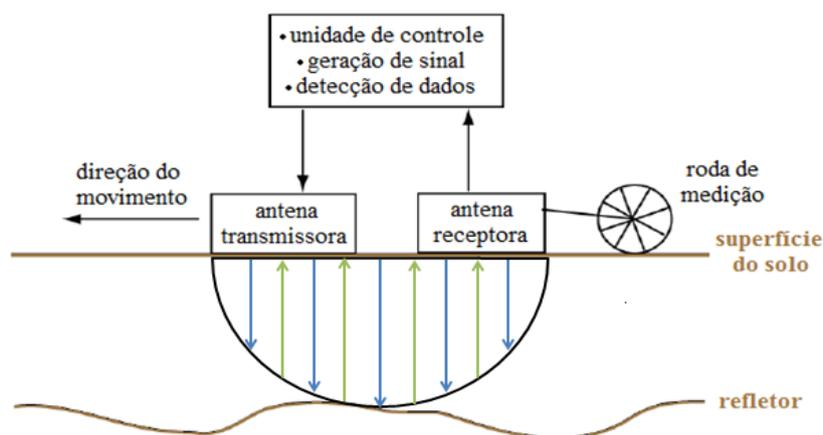


Figura 2.2. Princípios de medição do GPR.

Segundo Ludwig et al. (2011), pulsos eletromagnéticos de alta frequência são emitidos no subsolo pela antena transmissora. As ondas do GPR propagam pelo solo e o

tempo de viagem e a amplitude da onda são gravados pela antena receptora. Em contraste com a técnica TDR, o GPR opera com ondas “livres” e utiliza antenas enquanto o TDR opera com ondas guiadas que se propagam nas hastes da sonda. O tempo de viagem da onda depende do caminho pelo qual a onda propaga e das propriedades dielétricas dos materiais. A parte principal do sistema GPR é a unidade de controle que gera o sinal do GPR e também recebe os sinais depois que eles passam pelo solo. O sistema completo é controlado por computador. A roda de medição atrás da caixa de antena receptora mede a distância ao longo do caminho percorrido pela onda e provoca a emitância dos pulsos eletromagnéticos.

O sistema GPR é especificado pela sua frequência central (f_c) e, normalmente, suas antenas (transmissora e receptora) são projetadas para atuar numa faixa situada entre 0,5 vezes a frequência central (frequência mínima) até 1,5 vezes a frequência central (frequência máxima). A frequência central tem um importante papel para a profundidade de penetração da onda eletromagnética em sub-superfície, sendo esta a principal limitação do GPR. Aumentando-se a frequência da onda transmitida, resulta-se em uma maior resolução da sub-superfície e menor profundidade de penetração. Por outro lado, diminuindo-se a frequência, aumenta-se a profundidade de penetração, e, por conseguinte, obtém-se uma menor resolução. Além da frequência central, a profundidade de penetração da onda também é altamente dependente das propriedades elétricas dos materiais geológicos, isto é, da condutividade elétrica e da constante dielétrica (Souza, 2005).

O GPR é uma das técnicas de medição geofísica mais utilizada e sua grande vantagem é a boa aplicabilidade sob a maioria das condições de campo. As medições são rápidas e permitem explorar eficientemente e de maneira não invasiva grandes áreas em escalas que variam de dezenas de metros até alguns quilômetros. O GPR é mais adequado para fazer medições em materiais de baixa perda como areia e pedregulho já que eles são bem penetráveis por ondas de rádio. Em solos de textura fina como argila e solos com alta condutividade elétrica, o GPR é menos adequado já que os sinais são muito atenuados (Ludwig et al., 2011). Além disso, segundo Akbas et al. (2009), superfícies argilosas também podem criar problema nas medições do GPR, pois as ondas eletromagnéticas são expostas à absorção nestas superfícies.

O GPR é um método capaz de mapear áreas extensas. Mas este mapeamento não se dá de forma detalhada com obtenção direta de propriedades específicas do solo (parâmetros geotécnicos). Para isso, este método deve ser complementado com técnicas diretas de investigação como sondagens mecânicas ou ensaios.

2.3. PROPRIEDADES ELETROMAGNÉTICAS

Segundo Ulaby (2004), os parâmetros eletromagnéticos constitutivos de um material são a permissividade elétrica (ϵ), a permeabilidade magnética (μ) e a condutividade elétrica (σ). A condutividade elétrica de um material é a medida da facilidade dos elétrons de viajarem pelo material sob a influência de um campo elétrico externo. Os materiais são classificados em condutores (metais) ou dielétricos (isoladores) de acordo com as magnitudes das suas condutividades. Um dielétrico perfeito é um material com $\sigma = 0$ e um condutor perfeito é um material com $\sigma \rightarrow \infty$.

De acordo com Kubacki et al. (2011), existem duas maneiras dos materiais se protegerem contra a radiação. Uma é refletindo e a outra é absorvendo a energia eletromagnética incidente. O absorvedor ideal deve ter baixa refletividade e alto valor de absorção de energia eletromagnética incidente. O campo eletromagnético incidente no limite da superfície de qualquer material é refletido e o nível de energia refletida é uma função de parâmetros internos do material. A energia que não é nem refletida e nem absorvida pelo material é transmitida de um lado para o outro. As propriedades eletromagnéticas podem ser descritas em termos de permissividade e permeabilidade complexa relativa.

Segundo Callister & Rethwisch (2009), a permeabilidade relativa (μ_r) de um material é a medida do grau no qual o material pode ser magnetizado, ou a facilidade com que uma densidade de fluxo magnético pode ser induzida na presença de um campo magnético externo e é dada pela Eq. 2.1.

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} = \mu'_r + j\mu''_r \quad (2.1)$$

Onde:

μ_r = permeabilidade relativa;

μ = permeabilidade magnética;

μ_0 = permeabilidade do vácuo;

μ'_r = parte real da permeabilidade relativa;

μ''_r = parte imaginária da permeabilidade relativa;

$j = \sqrt{-1}$.

A permeabilidade do vácuo (μ_0) é uma constante universal dada pelo valor de $4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m.

A permeabilidade magnética relativa consiste em uma parte real (μ'_r) que representa a energia magnética armazenada no material e uma parte imaginária (μ''_r) que representa a energia magnética perdida no material, ambas as energias decorrentes de um campo magnético externo. De acordo com Knoll (1996), a maioria dos materiais geológicos não são magnéticos, tornando sua permeabilidade magnética muito próxima da permeabilidade do vácuo ($\mu_r = 1$). Esta consideração é quase sempre adequada, exceto para materiais que contêm quantidades consideráveis de ferro, níquel ou cobalto que possam alterar a permeabilidade magnética do material. Por outro lado, segundo Agilent Technologies (2005), todos os materiais têm propriedades dielétricas. Então, o foco deste trabalho será dado principalmente para as medidas de permissividade elétrica.

A permissividade relativa (ϵ_r), normalmente chamada de constante dielétrica, é maior do que a unidade, representa o aumento na capacidade de armazenamento de carga pela inserção de um meio dielétrico e é dada pela Eq. 2.2 (Callister & Rethwisch, 2009):

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} = \epsilon'_r + j\epsilon''_r \quad (2.2)$$

Onde:

ϵ_r = permissividade relativa;

ϵ = permissividade elétrica;

ϵ_0 = permissividade do vácuo;

ϵ'_r = parte real da permissividade relativa;

ϵ''_r = parte imaginária da permissividade relativa.

A permissividade do vácuo (ϵ_0) é uma constante universal dada pelo valor de $\frac{1}{36\pi} \cdot 10^{-9}$ F/m.

A parte real da permissividade relativa (ϵ'_r) é a medida de quanta energia de um campo elétrico externo é armazenada em um material. A parte imaginária (ϵ''_r) é chamada de fator de perda e é a medida da dissipação ou da perda de energia elétrica de um material quando submetido a um campo elétrico externo. O fator de perda inclui os efeitos da perda dielétrica e da condutividade elétrica (Agilent Technologies, 2005).

Na Tab. 2.2 encontram-se as constantes dielétricas de alguns materiais.

Tabela 2.2. Constantes dielétricas de materiais geológicos comuns medidas a 100 MHz (Modificado – Martinez & Byrnes, 2001).

Material	Constante dielétrica (ϵ_r)	
	Davis & Annan (1989)	Daniels (1996)
Ar	1	
Água destilada	80	
Água fresca	80	
Água do mar	80	
Areia seca	3 - 5	
Areia úmida	20 - 30	
Arenito seco		2 - 3
Arenito úmido		5 - 10
Calcário	4 - 8	
Calcário seco		7
Calcário úmido		8
Siltes	5 - 30	
Argilas	5 - 40	
Argila seca		2 - 6
Argila úmida		15 - 40
Solo seco arenoso		4 - 6
Solo úmido arenoso		15 - 30
Solo seco argiloso		4 - 6
Solo úmido argiloso		10 - 15
Granito	4 - 6	
Granito seco		5
Granito úmido		7
Sal seco	5 - 6	

2.4. MEDIÇÃO DAS PROPRIEDADES ELETROMAGNÉTICAS

Segundo Rohde & Schwarz (2006), existem várias técnicas desenvolvidas para medir a permissividade e a permeabilidade relativa complexa dos materiais e cada uma delas tem suas limitações. Algumas dessas técnicas estão citadas abaixo:

- Técnica de transmissão/reflexão;
- Técnica da sonda coaxial aberta;
- Técnica do espaço livre;
- Técnica da ressonância.

Com o avanço de novas tecnologias, essas técnicas podem ser empregadas com um programa de *software* que mede os coeficientes complexos de reflexão e de transmissão

(parâmetros-S) com um analisador de rede vetorial e converte os dados em propriedades dielétricas complexas (permissividade elétrica relativa e permeabilidade magnética relativa).

2.5. PARÂMETROS-S

Segundo Pozar (2003), os parâmetros-S (parâmetros de espalhamento) relacionam a voltagem das ondas incidentes nas portas com a voltagem das ondas refletidas/transmitidas. Estes parâmetros podem ser medidos diretamente com um VNA (exemplo na Fig. 2.3).

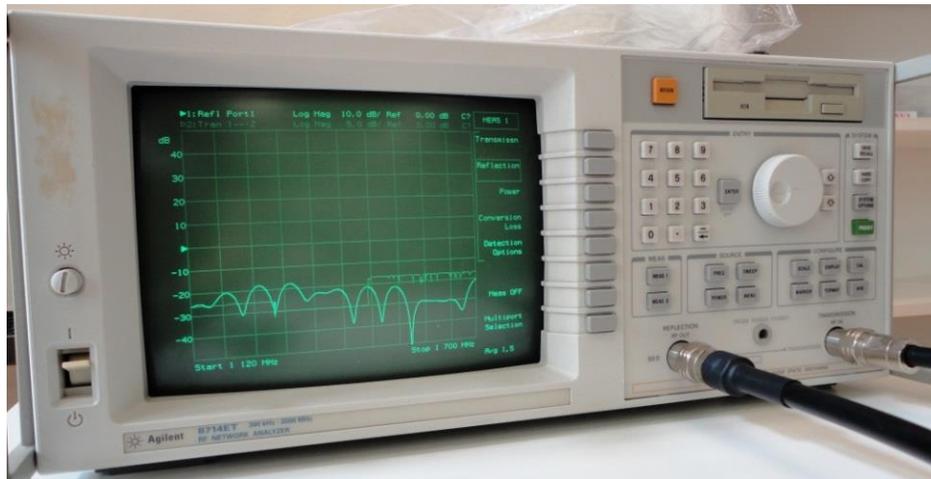


Figura 2.3. Vector Network Analyzer com faixa de frequência entre 300 kHz e 3.000 MHz.

Considere uma rede com “N” portas, onde V_n^+ é a voltagem da onda incidente na porta “n” e V_n^- é a voltagem da onda refletida/transmitida na porta “n” (com “n” variando de 1 a “N”). A matriz dos parâmetros-S (matriz [S]) é definida relacionando-se as voltagens das ondas incidentes e das ondas refletidas/transmitidas, conforme as Eqs. 2.3 e 2.4 abaixo.

$$[V^-] = [S] \cdot [V^+] \quad (2.3)$$

$$\begin{bmatrix} V_1^- \\ V_2^- \\ \vdots \\ V_N^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & \cdots & S_{1N} \\ S_{21} & \cdots & \cdots & \vdots \\ \vdots & \cdots & \cdots & \vdots \\ S_{N1} & \cdots & \cdots & S_{NN} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_1^+ \\ V_2^+ \\ \vdots \\ V_N^+ \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

Um elemento específico da matriz [S] pode ser determinado de acordo com a Eq. 2.5.

$$S_{ij} = \left. \frac{V_i^-}{V_j^+} \right|_{V_k^+ = 0 \text{ para } k \neq j} \quad (2.5)$$

Em outras palavras, a Eq. 2.5 diz que S_{ij} é encontrado incidindo-se uma onda de voltagem V_j^+ que entra na porta “j” e medindo-se a onda refletida/transmitida de voltagem V_i^- que sai na porta “i”. As ondas incidentes em todas as portas, exceto na j-ésima porta, são definidas como zero.

As voltagens das ondas incidentes e refletidas/transmitidas são números complexos que podem ser representados por uma amplitude, que representa a intensidade da onda, e uma fase, que representa o tempo de propagação. Desta forma, os parâmetros-S também são números complexos e podem ser escritos conforme a Eq. 2.6. O VNA extrai diretamente as fases (θ) e as amplitudes (A) dos parâmetros-S.

$$S_{ij} = A_{ij} \cdot e^{j\theta_{ij}} \quad (2.6)$$

2.5.1. PARÂMETROS-S PARA UMA REDE DE DUAS PORTAS

Para caracterizar uma rede de duas portas, que tem impedâncias características idênticas tanto na porta de entrada quanto na de saída, considere a matriz de espalhamento da Eq. 2.7. No campo de radiofrequência e micro-ondas, para minimizar as perdas nos cabos coaxiais a impedância característica padrão e mais comum utilizada é de 50 Ω .

$$[S] = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

A Fig. 2.4 apresenta um esquema da propagação do sinal em duas portas, onde V_1^+ é a voltagem que entra na porta 1, V_1^- é a voltagem que sai na porta 1, V_2^+ é a voltagem que entra na porta 2 e V_2^- é a voltagem que sai na porta 2. A fração de V_1^+ que é refletida na porta 1 é S_{11} e a fração transmitida é S_{21} . Analogamente, a fração de V_2^+ que é refletida na porta 2 é S_{22} e a fração transmitida é S_{12} . Ou seja, os parâmetros S_{11} e S_{22} são as frações refletidas das voltagens incidentes e os parâmetros S_{12} e S_{21} são as frações transmitidas (Pereira, 2007).

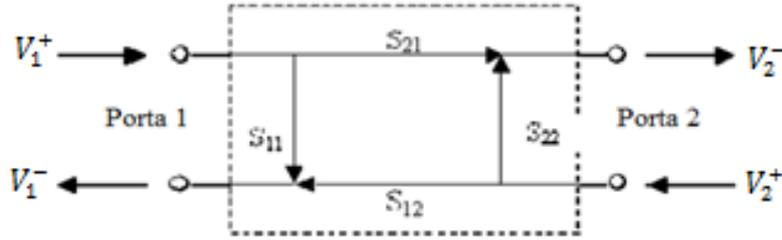


Figura 2.4. Esquema dos parâmetros-S e da propagação das ondas eletromagnéticas em um VNA de duas portas (Modificado – Pereira, 2007).

Assim, a matriz de espalhamento pode ser obtida conforme a Eq. 2.8.

$$\begin{bmatrix} V_1^- \\ V_2^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_1^+ \\ V_2^+ \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

2.5.2. PROPRIEDADES DOS PARÂMETROS-S

Segundo Radmanesh (2009), uma rede recíproca é definida como uma rede que satisfaz o teorema da reciprocidade. Para uma rede de duas portas, este teorema diz que a voltagem que aparece na porta 2 devido a uma corrente elétrica aplicada na porta 1 é a mesma que a voltagem que aparece na porta 1 quando a mesma corrente é aplicada na porta 2. Para todas as redes recíprocas, a matriz de espalhamento [S] é fisicamente simétrica, isto é, $S_{12} = S_{21}$.

Um caso especial de uma rede recíproca é uma rede simétrica. Redes simétricas são redes que têm tamanhos e valores de elementos iguais e mesmo arranjo para elementos elétricos correspondentes em referência a um plano ou a uma linha de simetria. Devido à simetria de uma rede, a impedância de entrada, obtida olhando-se para a porta de entrada, é igual a impedância da porta de saída. A igualdade das impedâncias de entrada e de saída leva à igualdade dos coeficientes de reflexão de entrada e de saída ($S_{11} = S_{22}$), em adição à igualdade de S_{12} e S_{21} requerida pelo teorema da reciprocidade.

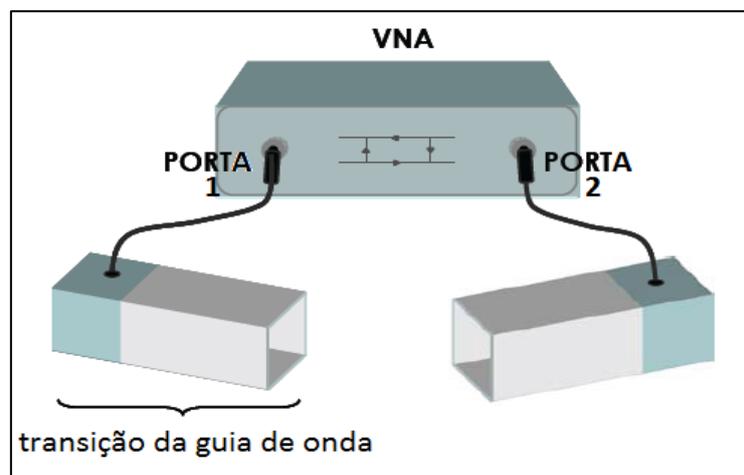
Ou seja, para redes simétricas, temos as seguintes condições (Eq. 2.9):

$$\begin{cases} S_{11} = S_{22} \\ S_{12} = S_{21} \end{cases} \quad (2.9)$$

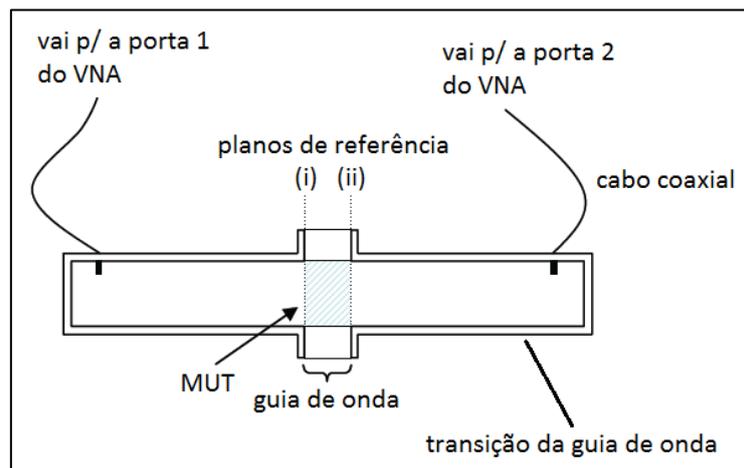
2.6. TÉCNICA DE TRANSMISSÃO/REFLEXÃO

Ná técnica de transmissão/reflexão (TR), um MUT é inserido numa guia de onda ou numa linha coaxial e esta amostra é submetida a um campo eletromagnético incidente gerado no VNA (Jarvis, 1990).

De acordo com Fouché (2006), o sistema de medição de um VNA com duas portas por meio de uma guia de onda é mostrado na Fig. 2.5. Os números romanos (i) e (ii) da Fig. 2.5 (b) indicam as posições de planos de referência fixos (planos de mudança de fase zero, de amplitude zero e de impedância conhecida) depois da calibração.



(a)



(b)

Figura 2.5. Sistema de medição de um VNA com duas portas (técnica TR): (a) VNA conectado às transições da guia de onda e (b) MUT inserido numa guia de onda (Modificado – Fouché, 2006).

2.6.1. GUIAS DE ONDA

De acordo com Orfanidis (2010), guias de onda são utilizadas para transferir a energia eletromagnética eficientemente de um ponto a outro. Algumas estruturas comuns de guia de onda incluem a linha coaxial, linha de dois condutores, a linha de transmissão de microtiras, a guia de onda retangular e as fibras óticas (Fig. 2.6).

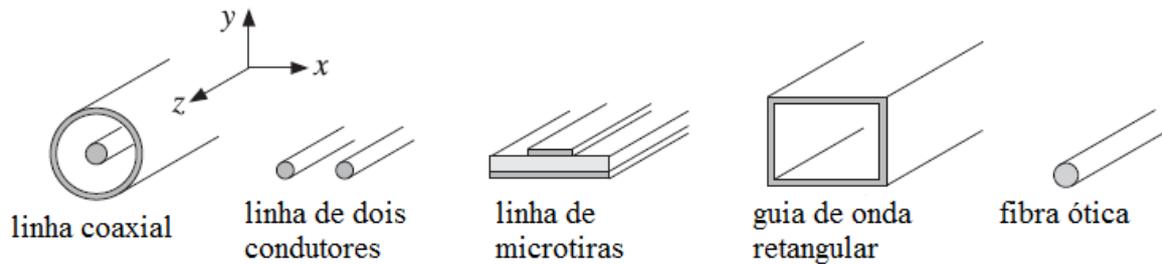


Figura 2.6. Estruturas típicas de guias de onda (Modificado – Orfanidis, 2010).

Segundo Pereira (2007), o dispositivo mais comumente utilizado é a guia de onda retangular (Fig. 2.7). Em sua fabricação é necessário alta precisão mecânica, onde a onda eletromagnética se propaga em um sistema fechado.

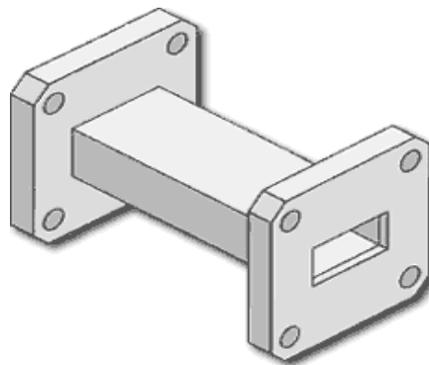


Figura 2.7. Guia de onda retangular.

2.6.1.1. DIMENSÕES DE UMA GUIA DE ONDA RETANGULAR

Segundo Pereira (2007), a utilização de guias de onda retangulares para a caracterização eletromagnética requer a montagem de corpos-de-prova que preencham completamente a guia de onda de maneira que não haja espaço entre o material e a parede da guia, evitando-se erros nas medições dos parâmetros-S devido à propagação da onda

eletromagnética pelas imperfeições existentes. Ou seja, a amostra deve ter dimensões exatamente iguais às dimensões internas da guia de onda. Por isso, o processo de preparação das amostras exige ferramentas adequadas e muita precisão.

As dimensões internas e externas de uma guia de onda são dadas de acordo com a faixa de frequência escolhida, segundo a Tab. A1 do Apêndice. Na Fig. 2.8, as dimensões internas de uma guia de onda retangular são representadas por “a” e “b” (sendo $b \leq a$) e o comprimento é dado por “L”.

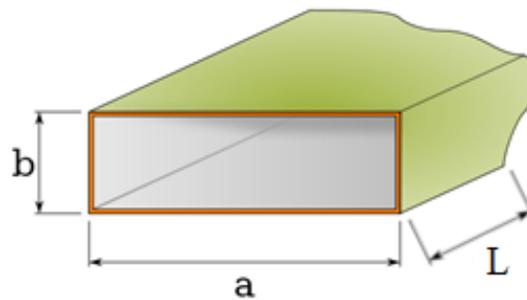


Figura 2.8. Dimensões internas de uma guia de onda retangular.

O comprimento “L” tipicamente adotado, segundo Jarvis (1990), está expresso na Eq. 2.10.

$$L = \frac{\lambda_g}{4} \quad (2.10)$$

Onde:

L = comprimento da guia de onda;

λ_g = comprimento de onda guiado.

Segundo Volakis (2007), o comprimento de onda em uma guia de onda uniforme, ou o comprimento de onda guiado (λ_g), é dado pela Eq. 2.11.

$$\lambda_g = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_c}\right)^2}} \quad (2.11)$$

Onde:

λ = comprimento de onda no espaço livre;

λ_c = comprimento de onda de corte.

Considerando-se que no espaço livre $\lambda = \frac{c}{f}$, $\lambda_c = 2a$ e substituindo-se estas informações na Eq. 2.11, obtém-se a Eq. 2.12.

$$\lambda_g = \frac{c}{f} \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{c}{2af}\right)^2}} \quad (2.12)$$

Onde:

c = velocidade da luz no vácuo;

f = frequência média escolhida.

As guias de onda também são compostas por um pino central e sua cabeça que servem para converter a corrente elétrica que passa pelo cabo coaxial em uma onda eletromagnética que se propaga dentro da guia de onda. Suas dimensões e posições na transição (d_1 , d_2 , d_3 , L_1 , L_2 e Q_w) dependem da guia de onda que está sendo utilizada, conforme ilustra a Fig. 2.9.

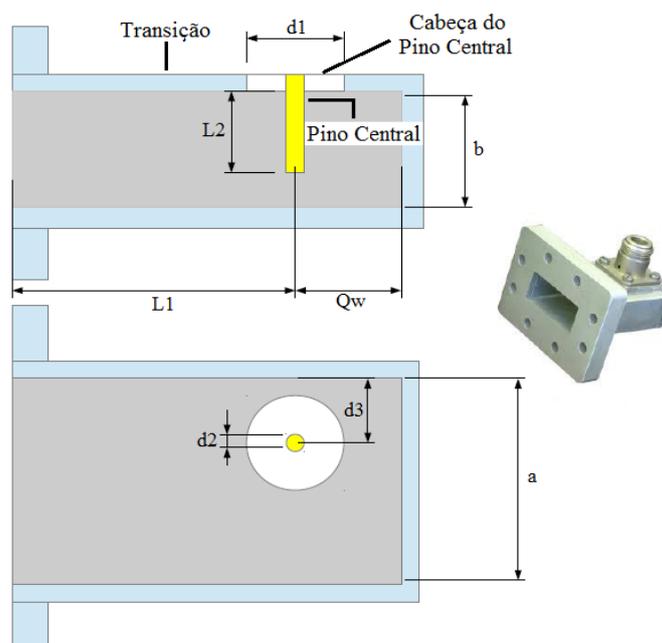


Figura 2.9. Posicionamento do pino central na transição.

Onde:

d_1 = diâmetro da cabeça do pino central;

d_2 = diâmetro do pino central;

d_3 = distância entre o eixo central do pino até a parede lateral mais próxima;

L_1 = distância entre o eixo central do pino até a abertura da transição;

L_2 = comprimento do pino central, a partir da parte interna da parede lateral;

Q_w = distância entre o eixo central do pino até a parede de fundo da transição.

Alguns fatores de forma geométricos (F_1 , F_2 e F_3) podem ser obtidos para avaliar como o posicionamento do pino central pode influenciar nas medições dos parâmetros-S, conforme as Eqs. 2.13, 2.14 e 2.15.

$$F_1 = \frac{d_2}{d_1} \quad (2.13)$$

$$F_2 = \frac{b - L_2}{b} \quad (2.14)$$

$$F_3 = \frac{d_2}{L_2} \quad (2.15)$$

Onde:

F_1 = fator de forma que relaciona o diâmetro do pino central com o diâmetro da cabeça do pino;

F_2 = fator de forma que relaciona a distância entre a extremidade do pino central até a borda da parede lateral com a dimensão interna “b” da transição;

F_3 = fator de forma que relaciona o diâmetro do pino central com seu comprimento a partir da parte interna da parede lateral.

Quanto menor for o valor de F_1 , maior será o espaço na cabeça do pino para a propagação da corrente elétrica e menor será a perturbação que esta corrente irá sofrer ao passar por essa abertura. Ou seja, quanto menor F_1 , melhor. Quanto maior for o valor de F_2 , melhor será, pois a distância entre a extremidade do pino central e a parede lateral deve ser grande para que o comprimento do pino central seja pequeno de modo a evitar o

desalinhamento deste. Para F_3 , quanto maior for seu valor, também será melhor, pois com o aumento da relação entre o diâmetro do pino central e o seu comprimento, o alinhamento do pino será muito mais preciso, evitando-se pequenos desvios que podem ocorrer.

2.6.2. CALIBRAÇÃO TRL E PARÂMETROS-S DO MUT

Em qualquer medição de parâmetros-S existem fontes de erros sistemáticos e aleatórios que podem mudar completamente a resposta de amplitude e fase do MUT. A calibração TRL (*Thru – Reflect – Line*) corrige os erros sistemáticos introduzidos pelo desvio dos planos de referência e pelas perdas dos cabos, dos conectores e de outros acessórios. Os padrões de calibração devem ser o mais próximo possível do desempenho teórico porque cada defeito em um padrão será transformado em um erro durante a calibração. A calibração TRL irá fornecer uma matriz de correção para cada intervalo de frequência (Fleury & Bernard, 2003).

Segundo Ebara et al. (2006), os procedimentos de uma calibração TRL são citados a seguir:

- A calibração *Thru* é realizada medindo-se os parâmetros-S de duas transições conectadas entre si, sem a guia de onda (Fig. 2.10);

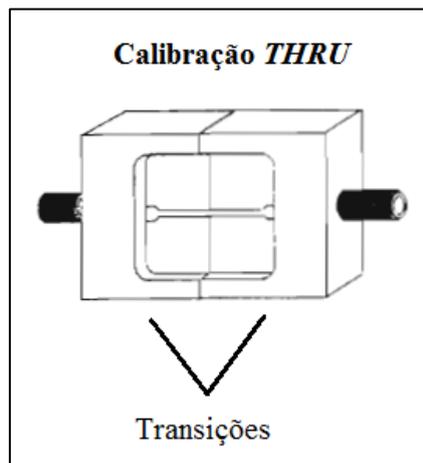


Figura 2.10. Calibração *Thru* com duas transições.

- A calibração *Reflect* é realizada medindo-se os parâmetros-S de apenas uma transição e pode ser feita de duas maneiras: *Open* e *Short*. A calibração *Open* (Fig. 2.11 (a)) utiliza uma transição aberta em uma das extremidades e a *Short* (Fig. 2.11 (b)) utiliza uma transição e uma placa metálica em seu extremo.

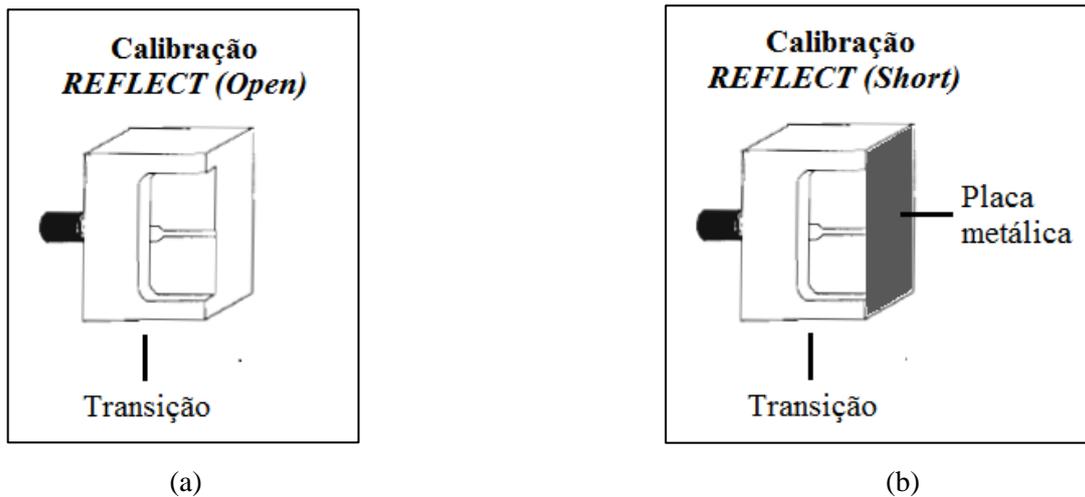


Figura 2.11. Calibração *Reflect* com apenas uma transição: (a) calibração *Open* com uma extremidade aberta e (b) calibração *Short* com uma placa metálica em seu extremo.

- A calibração *Line* é dada medindo-se os parâmetros-S do conjunto composto pela guia de onda (com comprimento de $\lambda_g/4$) posicionada entre as duas transições, conforme a Fig. 2.12.

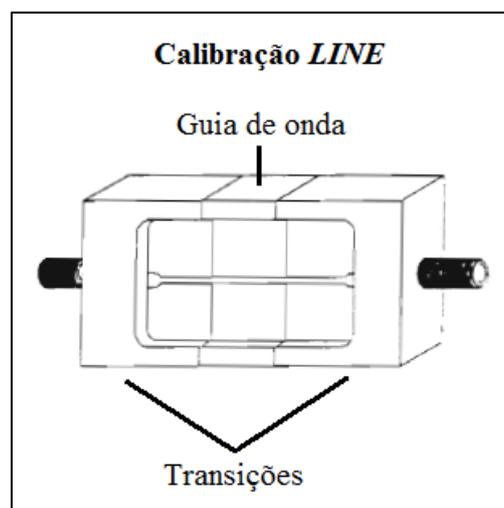


Figura 2.12. Calibração *Line* com uma guia de onda posicionada entre duas transições.

Segundo Whites (2012), a matriz de espalhamento medida diretamente pelo VNA ($[S]_M$) representa a matriz não calibrada de parâmetros-S do MUT. A calibração TRL gera matrizes de erro das transições ($[S]_A$ e $[S]_B$) que irão corrigir os erros sistemáticos da medição. A matriz calibrada de parâmetros-S do MUT ($[S]_{MUT}$) é extraída da combinação

entre $[S]_M$, $[S]_A$ e $[S]_B$. Em um sistema com VNA de duas portas, todas essas matrizes podem ser convertidas em matrizes-T, também chamadas de matrizes ABCD, para simplificar o cálculo. Assim, tem-se a relação da Eq. 2.16 (Matthews & Song, 1993).

$$[T]_M = [T]_A \cdot [T]_{MUT} \cdot [T]_B \quad (2.16)$$

Onde:

$[T]_M$ = matriz-T não calibrada do MUT medida diretamente pelo VNA (Fig. 2.13);

$[T]_A$ e $[T]_B$ = matrizes-T de erros virtuais, obtidas na calibração TRL (Fig. 2.13.);

$[T]_{MUT}$ = matriz-T calibrada do MUT.

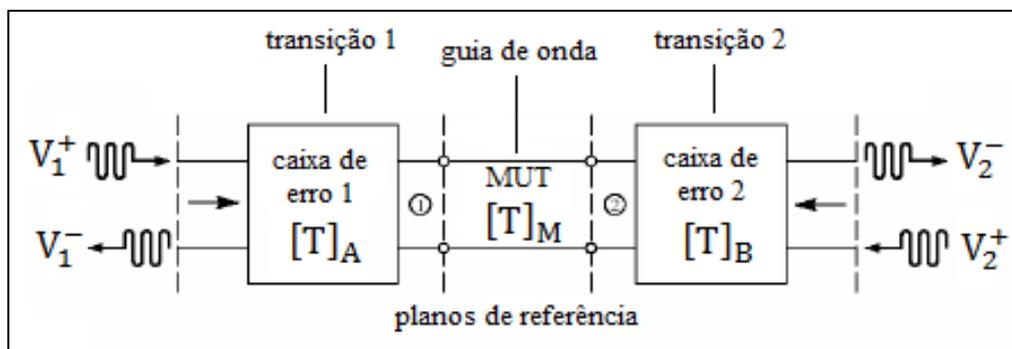


Figura 2.13. Configuração das matrizes-T (Modificado – Whites, 2012).

Desta forma, a partir da Eq. 2.16, obtém-se a Eq. 2.17 que fornecerá a matriz $[T]_{MUT}$ desejada.

$$[T]_{MUT} = [T]_A^{-1} \cdot [T]_M \cdot [T]_B^{-1} \quad (2.17)$$

A matriz $[T]_{MUT}$ encontrada pode ser convertida novamente na matriz $[S]_{MUT}$. Esta matriz final dos parâmetros-S do MUT pode ser relacionada com a constante dielétrica do material por meio de um sistema de equações.

2.7. RELAÇÃO ENTRE CONSTANTE DIELETRICA E PARÂMETROS GEOTÉCNICOS

Diferentes abordagens foram utilizadas para modelar as propriedades dielétricas de materiais geológicos. Algumas dessas abordagens incluem modelos empíricos, modelos

fenomenológicos, fórmulas de mistura volumétrica, teorias do meio eficaz e modelos semi-empíricos (Knoll, 1996).

De acordo com Martinez & Byrnes (2001), cada método tem suas vantagens e desvantagens baseadas em suposições intrínsecas ao modelo. Alguns modelos (teoria do meio eficaz e fenomenológico) funcionam bem com materiais relativamente homogêneos assim como o gelo, mas são menos efetivos para materiais mais complexos e heterogêneos. Os modelos empíricos e semi-empíricos podem prever precisamente os valores para os dados utilizados para construí-los, mas não são amplamente aplicáveis para um conjunto de dados com diferentes mineralogia, porosidade ou saturação de água. O modelo de propagação do tempo (modelo TP), um modelo de mistura volumétrica, foi dado por Martinez & Byrnes (2001) como o método mais usual e fácil de implementar em materiais geológicos. Não só os parâmetros de entrada são facilmente obtidos, mas a equação matemática para calcular os valores da constante dielétrica é simples (e por isso muito utilizada) e os resultados obtidos pelo modelo TP são similares aos valores observados.

Segundo Knoll (1996), considerando-se materiais lineares homogêneos e isotrópicos, a abordagem do modelo de mistura volumétrica relaciona a constante dielétrica de uma mistura multifásica (ϵ_r) com a constante dielétrica e as frações de volume de cada fase (ou componente). Uma fórmula geral, também conhecida como equação de Lichtenecker-Rother (1937), foi criada para este modelo e é mostrada na Eq. 2.18.

$$\epsilon_r^\alpha = \sum_{i=1}^N V_i \cdot \epsilon_i^\alpha \quad (2.18)$$

Onde:

V_i = fração de volume do i-ésimo componente;

ϵ_i = constante dielétrica do i-ésimo componente;

α = fator geométrico que relaciona a direção da camada efetiva dos componentes com a direção do campo elétrico aplicado (pode variar de -1 a 1).

De acordo com Knoll (1996), devido à proporcionalidade da raiz quadrada da constante dielétrica com a propagação do tempo de viagem (t_v) mostrada na Eq. 2.19, no modelo TP o valor do fator geométrico é definido como $\alpha = 0,5$. Assim, obtém-se a Eq. 2.20 para o modelo TP (Martinez & Byrnes, 2001).

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} = \frac{2d}{t_v} \quad (2.19)$$

Onde:

v = velocidade na qual as ondas eletromagnéticas viajam através do material;

d = distância até o refletor;

t_v = tempo de viagem de ida e volta das ondas eletromagnéticas refletidas.

$$\epsilon_r = \left[\sum_{i=1}^N V_i \cdot (\epsilon_i)^{0,5} \right]^2 \quad (2.20)$$

No estudo feito por Knoll (1996), foi utilizado um analisador de impedância para medir as propriedades eletromagnéticas de amostras de argila pura, areia pura e misturas de argila e areia em condições de secagem natural, variando-se as porosidades de maneira controlada. Também foram utilizadas amostras de areia argilosa e argila arenosa com grau de saturação de água conhecido. Os resultados foram obtidos numa faixa de frequência de 10 kHz a 10 MHz e comparados às previsões da fórmula de mistura volumétrica dada pela Eq. 2.20. Os gráficos obtidos por Knoll (1996) estão expostos nas Figs. 2.14, 2.15, 2.16 e 2.17.

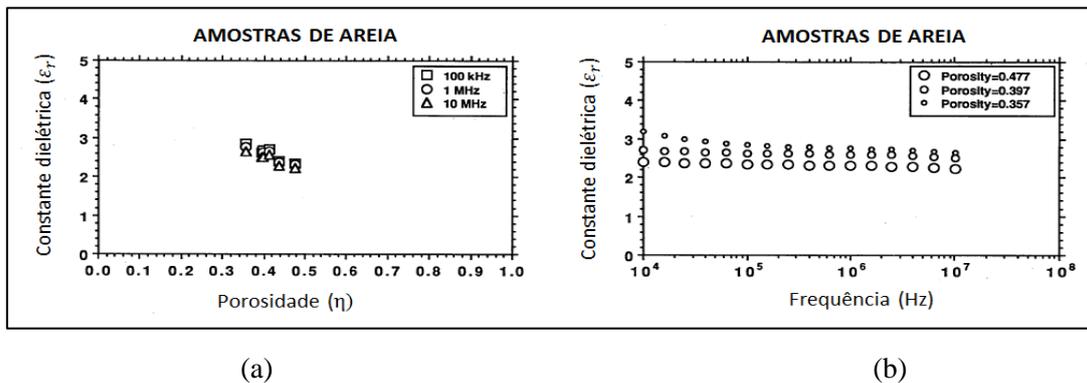
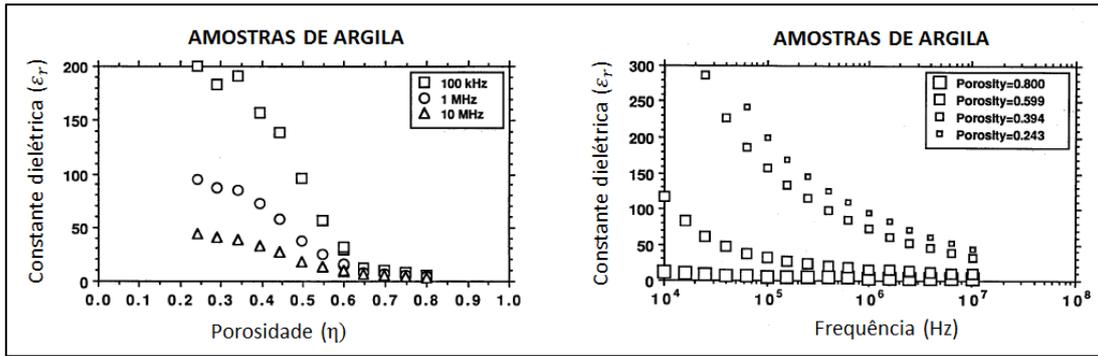


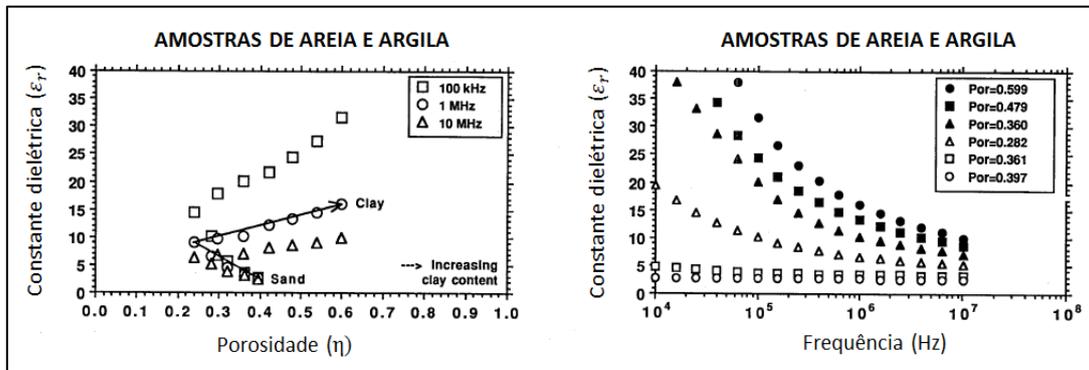
Figura 2.14. Amostras de areia: (a) constante dielétrica *versus* porosidade e (b) constante dielétrica *versus* frequência (Modificado – Knoll, 1996).



(a)

(b)

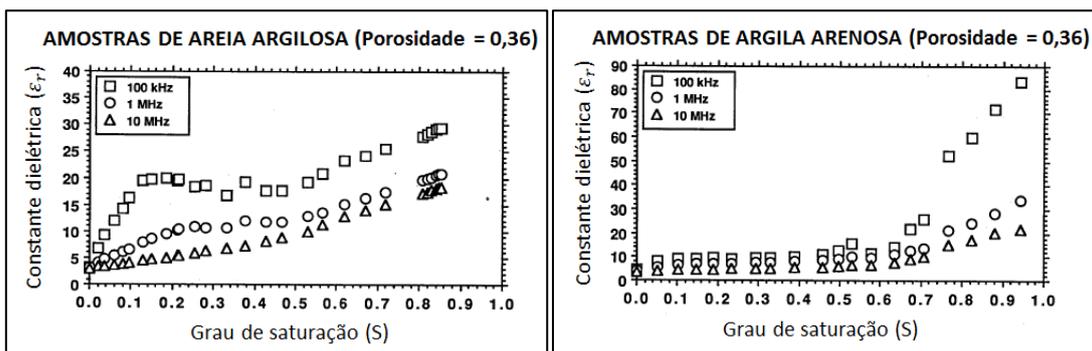
Figura 2.15. Amostras de argila: (a) constante dielétrica *versus* porosidade e (b) constante dielétrica *versus* frequência (Modificado – Knoll, 1996).



(a)

(b)

Figura 2.16. Amostras de areia e argila: (a) constante dielétrica *versus* porosidade e (b) constante dielétrica *versus* frequência (Modificado – Knoll, 1996).



(a)

(b)

Figura 2.17. Constante dielétrica *versus* grau de saturação: (a) amostras de areia argilosa e (b) amostras de argila arenosa (Modificado – Knoll, 1996).

Nas amostras de areia (Fig. 2.14) observou-se uma diminuição quase linear da constante dielétrica com o aumento da porosidade e certa constância da constante dielétrica, especialmente para a porosidade grande de 0,8, com o aumento da frequência.

Nas amostras de argila (Fig. 2.15) o aumento da porosidade resultou numa diminuição não linear da constante dielétrica. Esta redução tende a ficar constante a partir de uma porosidade de 0,7, principalmente para a frequência maior de 10 MHz. Além disso, um aumento da frequência ocasionou uma diminuição da constante dielétrica para amostras com porosidades mais baixas e, à medida que a porosidade aumentava, a constante dielétrica se tornava mais invariável com a mudança da frequência. Mas para todas as porosidades, pôde-se ver uma tendência à constância da constante dielétrica para frequências maiores (perto de 10 MHz).

Nas amostras de areia e argila (Fig. 2.16) a porosidade parece ser diretamente proporcional à constante dielétrica quando se tem um aumento no teor de argila e inversamente proporcional quando se tem um aumento no teor de areia. A constante dielétrica tende a ser constante à medida que a frequência aumenta.

Para as amostras de areia argilosa (Fig. 2.17 (a)), o aumento do grau de saturação causa um aumento na constante dielétrica praticamente linear, tirando-se as amostras quase secas com frequência de 100 kHz. Nas amostras de argila arenosa (Fig. 2.17 (b)) observa-se uma constância da constante dielétrica para uma variação do grau de saturação de 0 a 0,65. Para valores maiores do que 0,65, à medida que o grau de saturação aumenta, a constante dielétrica também aumenta de uma maneira não linear.

A porosidade (η) e a umidade volumétrica (θ_v) são parâmetros geotécnicos que podem ser obtidos através da constante dielétrica de um material. Sabouroux & Ba (2011) mostram que a partir da Eq. 2.20 do modelo TP encontra-se a Eq. 2.21 para uma amostra com apenas 3 componentes (sólido, água e ar).

$$\varepsilon_r = \left[(1 - \eta) \cdot \sqrt{\varepsilon_s} + \theta_v \cdot \sqrt{\varepsilon_w} + (\theta_v - \eta) \cdot \sqrt{\varepsilon_{ar}} \right]^2 \quad (2.21)$$

Onde:

ε_s = constante dielétrica do mineral sólido;

ε_w = constante dielétrica da água;

ε_{ar} = constante dielétrica do ar.

Esta mesma equação acima pode ser escrita de outra forma inserindo-se o índice de vazios (e) ao invés da porosidade (η), por ser mais usado na Geotecnia, conforme a Eq. 2.22.

$$\varepsilon_r = \left[\left(\frac{1}{1+e} \right) \cdot \sqrt{\varepsilon_s} + \theta_v \cdot \sqrt{\varepsilon_w} + \left(\frac{e}{1+e} - \theta_v \right) \cdot \sqrt{\varepsilon_{ar}} \right]^2 \quad (2.22)$$

As constantes dielétricas dos componentes (ε_s , ε_w e ε_{ar}) são conhecidas e podem ser retiradas da Tab. 2.2. Desta forma, a constante dielétrica do material é função apenas do índice de vazios (e) e da umidade volumétrica (θ_v) do material, conforme a Eq. 2.22.

Isolando-se o índice de vazios na Eq. 2.22, obtém-se a Eq. 2.23.

$$e = \frac{\theta_v \cdot (\sqrt{\varepsilon_w} - \sqrt{\varepsilon_{ar}}) + \sqrt{\varepsilon_s} - \sqrt{\varepsilon_r}}{\theta_v \cdot (\sqrt{\varepsilon_{ar}} - \sqrt{\varepsilon_w}) + \sqrt{\varepsilon_r} - \sqrt{\varepsilon_{ar}}} \quad (2.23)$$

E assim, tem-se a relação entre a constante dielétrica de um material e parâmetros geotécnicos (índice de vazios e umidade volumétrica).

3. METODOLOGIA E MATERIAIS

A metodologia deste trabalho pretende descrever as etapas que foram realizadas nesta pesquisa. Estas etapas podem ser divididas em três, conforme listadas abaixo:

- Coleta das amostras;
- Pré-caracterização geotécnica do solo;
- Caracterização eletromagnética do solo;

3.1. COLETA DAS AMOSTRAS

A coleta das amostras foi realizada com a ajuda de um técnico no Campo Experimental de Fundações e Ensaio de Campo do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília (UnB), localizado em Brasília, Distrito Federal. A escavação foi feita com uma picareta e foram coletadas amostras deformadas a partir de 1,0 m de profundidade, pois o solo não era virgem antes disso (Fig. 3.1). As amostras foram coletadas aproximadamente entre as profundidades de 1,0 e 2,0 m. O local da escavação é próximo ao prédio Observatório Sismológico da UnB (OBSIS), em frente ao prédio SG-12. A localização exata do lugar está ilustrada na Fig. 3.2.



(a)

(b)

Figura 3.1. Coleta de amostras deformadas no campo experimental de Geotecnia da UnB: (a) escavação do técnico com a picareta e (b) amostras coletadas.



(a)



(b)

Figura 3.2. Local da coleta de amostras: (a) localização em relação ao prédio SG-12 e OBSIS e (b) aproximação e detalhes do local da escavação.

Segundo Mota (2003), na área referente ao campo experimental citado, tem-se um perfil típico da camada de solo laterítico vermelho argiloso (argila porosa) que mostra três horizontes bem diferentes:

- 0 a 3,5 m – camada de areia argilo-siltosa porosa, com predominância de gibbsita, macroporos e muitos agregados, com alto índice de vazios (entre 1,27 e 1,60), peso específico dos sólidos em torno de $26,5 \text{ kN/m}^3$ e índice de plasticidade médio de 10%. Destaca-se que as propriedades de 3,0 a 4,0 m correspondem à zona de transição. Esta zona corresponde ao trecho na qual ocorrem as maiores variações de umidade ao longo do ano;

- 3,5 a 8,5 m – camada de argila areno-siltosa, zona na qual as propriedades físicas, mineralógicas e microestruturais vão gradualmente se alterando até encontrar o residual mais jovem a 8,5 m. Neste trecho, o teor de gibbsita, a porosidade e a macroporosidade vão paulatinamente diminuindo, com índice de vazios decrescentes (1,27 a 0,89), peso específico dos sólidos e índice de plasticidade semelhantes à camada anterior.
- 8,5 m – profundidade a partir da qual o solo assume textura mais siltosa, caracterizada por um leve aumento do índice de vazios (0,96 a 1,08), do peso específico dos sólidos (em torno de 27,4 kN/m³) e do índice de plasticidade (valor médio de 17%) com distribuição de poros mais homogênea. Nesta profundidade já não aparece mais a gibbsita.

Na profundidade em estudo (de 1,0 a 2,0 m), encontra-se elevada porcentagem de óxidos e hidróxidos de ferro (hematita e goethita), conforme Mota (2003).

3.2. PRÉ-CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA DO SOLO

Após a coleta de amostras, o solo foi levado para o Laboratório de Geotecnia da Universidade de Brasília onde foram realizados alguns procedimentos e ensaios para a pré-caracterização geotécnica deste solo como: secagem, destorroamento e peneiramento do solo; ensaio de compactação; e ensaio de determinação da massa específica dos grãos do solo.

3.2.1. PROCEDIMENTOS E SEPARAÇÃO DO SOLO

Para o estudo inicial visado nesta pesquisa decidiu-se trabalhar apenas com um tipo de solo (argila) para que a pesquisa tivesse um foco único e fosse mais produtiva. Desta forma, antes de iniciar os ensaios, foi necessário obter a porção de argila do solo coletado. De acordo com a ASTM 2488 (2009), argila é o solo fino que passa na peneira Nº 200 com um índice de plasticidade maior ou igual a 4%. Conforme visto por Mota (2003), na profundidade onde o solo foi coletado o índice de plasticidade médio é de 10%, portanto tem propriedade plástica de argila. Então, para completar as características argilosas, o solo teria que passar na peneira Nº 200. Mas antes do peneiramento, foi feita a secagem do solo no laboratório e, em seguida, o solo seco foi então destorroado e peneirado na peneira Nº 200 (Fig. 3.3).



(a)



(b)



(c)

Figura 3.3. Preparação para obter a porção de argila do solo: (a) secagem, (b) destorroamento e (c) peneiramento na peneira N° 200.

3.2.2. ENSAIO DE MASSA ESPECÍFICA DOS GRÃOS DO SOLO

Após a separação da argila, iniciou-se a preparação de uma porção deste solo (cerca de 800 g) para a determinação da massa específica dos grãos de solo que passam na peneira de 4,8 mm, de acordo com a NBR 6457 (1986). Como o solo já havia passado na peneira de 0,075 mm, a condição de passar na peneira de 4,8 mm já estava satisfeita. O ensaio foi realizado utilizando-se um picnômetro de 500 cm³ e outros materiais, conforme a NBR 6508 (1984). O experimento foi feito com três amostras de solo sendo que o resultado de uma delas não foi satisfatório e foi desprezado, pois o valor da massa específica dos grãos de solo diferiu em mais de 0,02 g/cm³ dos outros dois.

3.2.3. ENSAIO DE COMPACTAÇÃO

Toda a porção de argila do solo coletado (aproximadamente 15 kg) foi preparada para o ensaio de compactação, conforme a NBR 6457 (1986). Devido ao fato de o solo ser muito fino, pois já tinha passado na peneira N° 200, o ensaio de compactação pôde ser realizado com cilindro pequeno e energia de compactação Proctor Normal, de acordo com a NBR 7182 (1986).

Inicialmente, esse solo foi preparado com secagem prévia até a umidade higroscópica. Em seguida, foi feita a compactação sem reuso de material de cinco amostras (Fig. 3.4) acrescentando-se água em cada porção de solo de modo que, supostamente, a umidade ótima fosse igual a 23%. Logo após a compactação, foram calculados o teor de umidade, utilizando-se uma estufa a 110 °C (NBR 6457 – 1986), e a massa específica aparente seca de cada amostra de acordo com a NBR 7182 (1986), de modo a obter a curva de compactação. Todos os cinco pontos da curva de compactação ficaram situados no ramo seco e, por isso, houve uma necessidade de se acrescentar mais alguns pontos para o ramo úmido da curva. Assim, a compactação foi feita para mais três valores de umidade que complementaram a curva de compactação. Para estes três pontos, o mesmo solo utilizado antes foi preparado novamente com secagem prévia até a umidade higroscópica e foi realizado seu destorroamento e peneiramento. Após isso, o ensaio de compactação com reuso de material foi realizado e a curva de compactação foi regulada de forma que os dois primeiros pontos do ramo seco foram desprezados para melhorar o aspecto da curva (Fig. 4.1).



Figura 3.4. Corpos de prova após o ensaio de compactação com cilindro pequeno.

3.3. CARACTERIZAÇÃO ELETROMAGNÉTICA DO SOLO

A caracterização eletromagnética foi feita inteiramente no Rio Grande do Sul, em parceria com a empresa SOLENTECH - *Solution, Engineering & Technology* Ltda, localizada na Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUCRS), no campus de Viamão (Fig. 3.5). Esta etapa teve como objetivo utilizar um VNA para realizar medições de parâmetros-S de amostras de solo em guias de onda, convertê-los em propriedade eletromagnética (constante dielétrica) e, posteriormente, em parâmetros geotécnicos (índice de vazios e umidade volumétrica).



Figura 3.5. PUCRS, campus Viamão.

Antes das medições, algumas definições foram estabelecidas como, por exemplo, a frequência a ser utilizada e as respectivas dimensões das guias de onda. Além disso, os

ensaios eletromagnéticos foram controlados geotecnicamente. Ou seja, o teor de umidade e a energia de compactação utilizados na preparação das amostras foram manipulados (eram conhecidos) e um novo soquete foi dimensionado para realização da compactação em uma das guias de onda na etapa de preparação das amostras.

3.3.1. CONSIDERAÇÕES FEITAS

Nesta pesquisa fizeram-se quatro considerações:

- Permeabilidade magnética relativa unitária ($\mu_r = 1$) devido ao fato da argila utilizada não ter quantidades de níquel, ferro ou cobalto que possam alterar a permeabilidade magnética do solo estudado. Provavelmente, grande parte do ferro existente no solo coletado (hematita e goethita) foi retido na peneira N° 200 na etapa de separação da porção de argila;
- Para utilizar a Eq. 2.18 e as outras provenientes desta, as amostras foram consideradas lineares, homogêneas e isotrópicas.
- As constantes dielétricas de cada material foram consideradas sempre iguais às da Tab. 2.2 e invariáveis com a frequência de uso, pois não havia dados suficientes para saber precisamente os valores dessas constantes dielétricas em diferentes frequências;
- A rede utilizada para a medição dos parâmetros-S foi considerada uma rede simétrica, ou seja, $S_{12} = S_{21}$ e $S_{11} = S_{22}$.

3.3.2. FREQUÊNCIAS E DIMENSÕES DAS GUIAS DE ONDA

Antes da realização dos experimentos eletromagnéticos, foram definidas três frequências médias diferentes para serem utilizadas nos ensaios (Tab. 3.1). Estas foram calculadas pela média aritmética da frequência menor e da frequência maior, retiradas da Tab. A1 do Apêndice.

Tabela 3.1. Frequências estabelecidas a serem utilizadas na caracterização eletromagnética.

Bandas de frequência	Nome das guias de onda (EIA)	Frequência menor (GHz)	Frequência maior (GHz)	Frequência média a ser utilizada (GHz)
L	WR-650	1,12	1,70	1,41
X	WR-90	8,20	12,40	10,30
K	WR-42	18,00	26,50	22,25

Estas frequências foram escolhidas de modo a obter frequências iguais ou maiores do que as frequências utilizadas no GPR e, portanto, maior resolução. O VNA utilizado para os experimentos possui alcance de frequência de 10,00 MHz a 20,00 GHz, tem duas portas e foi fabricado pela empresa alemã Rohde & Schwarz. Devido ao limite superior de frequência do VNA, a última frequência média utilizada foi de 20,00 GHz, e não de 22,25 GHz. Mas isso não faz muita diferença, já que 20,00 GHz situa-se entre a frequência menor (18,00 GHz) e a maior (26,50 GHz), ou seja, encontra-se na faixa de frequência escolhida. As outras duas frequências também foram arredondadas para 1,50 GHz e 10,00 GHz.

O formato retangular da guia de onda é o mais utilizado e por isso foi escolhido para este estudo. As guias de onda foram fabricadas com a maior precisão possível. Aqui, elas foram enumeradas para facilitar posteriormente suas denominações. Suas dimensões transversais (“a” e “b” na Fig. 2.8) foram retiradas da Tab. A1 do Apêndice, de acordo com cada frequência escolhida (Tab. 3.2).

Tabela 3.2. Dimensões transversais das guias de onda retangulares.

Numeração das guias de onda	Frequência média utilizada (GHz)	Dimensões internas (cm)	Dimensões externas (cm)
1	1,50	16,510 x 8,255	16,916 x 8,661
2	10,00	2,286 x 1,016	2,540 x 1,270
3	20,00	1,070 x 0,430	1,270 x 0,635

O comprimento da guia de onda “L” foi calculado utilizando-se as Eqs. 2.10 e 2.12. Primeiro, encontrou-se o comprimento de onda guiado (λ_g) pela Eq. 2.12 e depois este resultado foi substituído na Eq. 2.10 para encontrar o comprimento da guia de onda.

Para as guias de onda escolhidas, temos os seguintes valores de dimensões e posicionamentos do pino central nas transições (Tab. 3.3).

Tabela 3.3. Dimensões e posicionamentos do pino central nas transições.

Guias de onda	Dimensões e posicionamentos (cm)							
	a	b	d₁	d₂	d₃	L₁	L₂	Q_w
1	16,51	8,26	0,70	0,30	8,21	> 3,00	5,38	7,17
2	2,29	1,02	0,30	0,13	1,14	> 1,00	0,58	0,60
3	1,07	0,43	0,30	0,13	0,53	> 1,00	0,26	0,30

3.3.3. ENERGIA DE COMPACTAÇÃO E DEFINIÇÃO DO SOQUETE

Antes do ensaio eletromagnético (medição de parâmetros-S no VNA) foi feita uma compactação do solo nas guias de onda e, para que houvesse um melhor controle deste solo, ele foi utilizado em condições semelhantes às condições de compactação de Proctor Normal, de modo que a curva de compactação obtida anteriormente foi usada como referência. Desta forma, a energia de compactação do ensaio de Proctor Normal foi mantida para os ensaios de caracterização eletromagnética. Porém, as dimensões dos cilindros utilizados no ensaio de compactação (NBR 7182, 1986) são diferentes das dimensões das guias de onda retangulares. Assim, foi necessário fazer ajustes das dimensões do soquete e do número de golpes que deveria ser dado para que a energia de compactação fosse a mesma do ensaio de Proctor Normal.

O dimensionamento do soquete foi feito apenas para a guia de onda 1, pois suas dimensões facilitaram a montagem do soquete. As guias de onda 2 e 3 eram muito pequenas para construir soquetes adequados. Então, o soquete da guia de onda 1 (Fig. 3.6) foi dimensionado baseado nas dimensões desta guia de onda e fazendo-se relações com os soquetes cilíndricos apresentados na NBR 7182 (1986). A espessura das paredes deste soquete é de 0,2 cm.

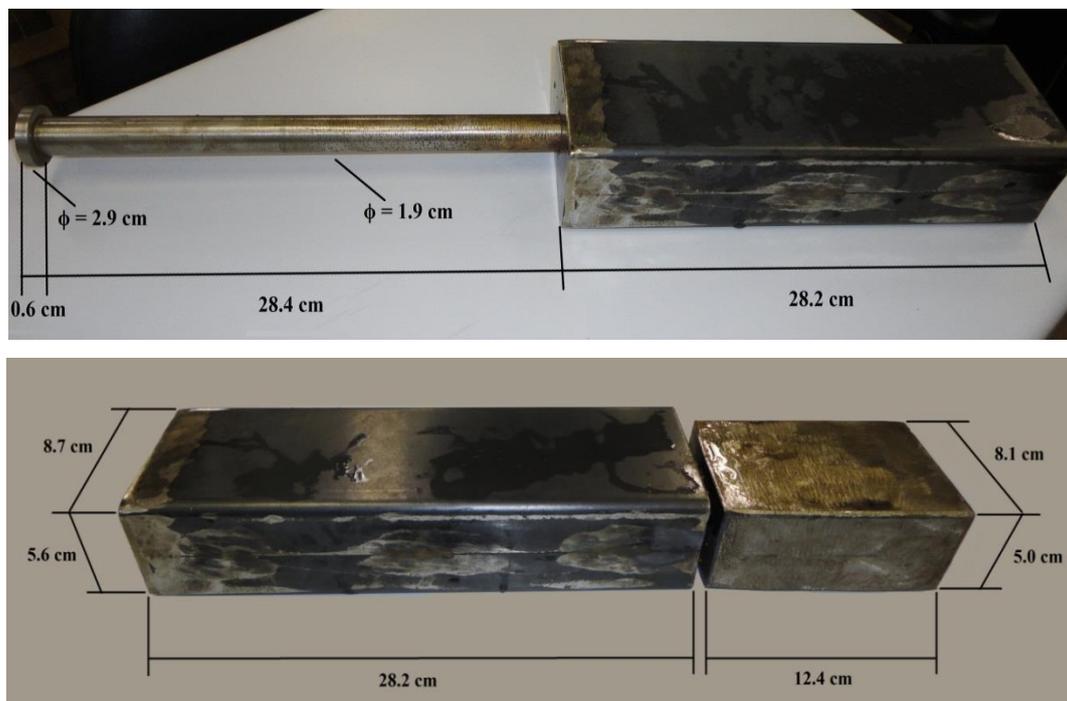


Figura 3.6. Dimensões atribuídas ao soquete da guia de onda 1.

Segundo Das (2007), a energia de compactação por unidade de volume (E) utilizada no ensaio de Proctor Normal pode ser determinada por meio da Eq. 3.1:

$$E = \frac{(\text{número de golpes em cada camada}) \cdot (\text{número de camadas}) \cdot (\text{peso do soquete}) \cdot (\text{altura de queda do soquete})}{\text{volume do molde}} \quad (3.1)$$

De acordo com Das (2007), a energia de compactação no ensaio de Proctor Normal é dada na Eq. 3.2:

$$E = 594 \text{ kN.m/m}^3 \quad (3.2)$$

No caso, a altura de queda do soquete foi estipulada em seu dimensionamento, em função dessa energia. Seu peso foi calculado de acordo com suas dimensões estabelecidas e utilizando-se a massa específica do aço ($\rho_{\text{aço}}$) usado para a confecção do soquete, detalhe dado pelo fornecedor. A energia de compactação é conhecida e dada pela Eq. 3.2 e o volume do molde é dado de acordo com as dimensões da guia de onda 1. Ou seja, as incógnitas da Eq. 3.1 são o número de camadas e o número de golpes em cada camada. Estipulando-se um número de camadas igual a três, a partir da Eq. 3.1, encontrou-se o número de golpes em cada camada necessário para que a energia de compactação continuasse igual a 594 kN.m/m³.

3.3.4. PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

O número total de amostras para o ensaio eletromagnético foi escolhido baseado nas condições de umidade desejadas e na viabilidade da realização do experimento. Um dos propósitos da caracterização eletromagnética era abranger os casos mais extremos possíveis de combinação da argila com os outros dois componentes (água e ar) para que os outros casos intermediários pudessem ser interpolados. Então, decidiu-se trabalhar com três amostras para cada guia de onda (obtendo-se um total de nove amostras) de modo que uma delas apresentava teor de umidade seco (o mais próximo possível de 0%), outra apresentava teor de umidade no extremo mais saturado da curva de compactação e a última amostra considerava um teor de umidade intermediário (ou natural), conforme a Tab. 3.4.

O solo coletado e preparado em Brasília foi dividido em três sacos (sacos 1, 2 e 3) cada um com teor de umidade diferente, de acordo com a Fig. 3.7 e a Tab. 3.4. Para cada

saco, foi calculado seu teor de umidade inicial numa estufa a 110 °C, situada no Laboratório de Mecânica dos Solos da PUCRS, segundo a NBR 6457 (1986). Estas determinações de teor de umidade foram realizadas na balança ilustrada na Fig. 3.8, com as seguintes capacidades:

- Capacidade máxima: 2.000 g;
- Capacidade mínima: 0,5 g;
- Menor divisão: 0,01 g.



Figura 3.7. Solo utilizado para a caracterização eletromagnética (sacos 1, 2 e 3).

Tabela 3.4. Teor de umidade desejado das amostras.

Sacos	Guia de onda			Teor de umidade desejado (%)
	1	2	3	
1	Amostra 1.1	Amostra 1.2	Amostra 1.3	Seco
2	Amostra 2.1	Amostra 2.2	Amostra 2.3	Natural
3	Amostra 3.1	Amostra 3.2	Amostra 3.3	Mais saturado possível



Figura 3.8. Balança utilizada para a determinação do teor de umidade inicial e final dos sacos.

Posteriormente, foram utilizados 2,5 kg de solo de cada saco, os quais foram preparados conforme os teores de umidade desejados (Fig. 3.9), adicionando-se água ou secando na estufa. Esta preparação foi realizada da mesma forma que a preparação das amostras no ensaio de compactação, segundo a NBR 7182 (1986). A balança utilizada nesta etapa (Fig. 3.10) tinha as seguintes capacidades:

- Capacidade máxima: 15.000 g;
- Capacidade mínima: 125 g;
- Menor divisão: 5 g.



Figura 3.9. Preparação das amostras antes da caracterização eletromagnética.



Figura 3.10. Balança utilizada na preparação das amostras e das guias de onda.

Após ter preparado o solo de cada saco com o teor de umidade desejado, estes foram fechados e guardados por um dia.

Antes de dar início aos ensaios, era de extrema importância saber a quantidade de massa de solo que deveria ser colocada em cada guia de onda. Assim, baseado na curva de compactação obtida, para cada teor de umidade desejado, obteve-se a massa específica aparente seca correspondente, num dado volume (no caso, o volume interno da guia de onda). Ou seja, pela Eq. 3.3 abaixo foi possível calcular a massa de solo necessária em cada guia de onda (m_n) de modo que o solo tivesse o mesmo comportamento da curva de compactação obtida.

$$m_n = V_g \cdot \rho_d \cdot \left(\frac{100 + w_d}{100} \right) \quad (3.3)$$

Onde:

m_n = massa de solo necessária em cada guia de onda;

V_g = volume interno da guia de onda;

ρ_d = massa específica aparente seca;

w_d = teor de umidade desejado.

As massas de cada guia de onda com suas duas paredes de plástico foram pesadas na balança da Fig. 3.10 antes do início da compactação das amostras. A parede de plástico tem a função de conter as amostras na guia de onda e, por ter uma constante dielétrica conhecida, este valor pode ser descontado nos cálculos de modo que não irá interferir na propagação da onda eletromagnética (Fig. 3.11).



Figura 3.11. Paredes de plástico da guia de onda 1.

Para as amostras da guia de onda 1 (amostras 1.1, 2.1 e 3.1), as massas de solo necessárias foram divididas igualmente para as três camadas de compactação. Então, a compactação destas amostras foi feita utilizando-se o soquete da Fig. 3.6 e aplicando-se o número de golpes por camada calculado (Fig. 3.12). Em seguida, foi utilizada uma régua de aço biselada de 30 cm para regular a superfície do topo das amostras.



(a)



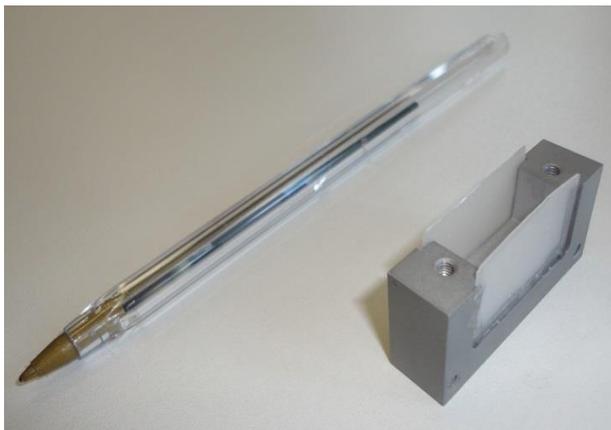
(b)



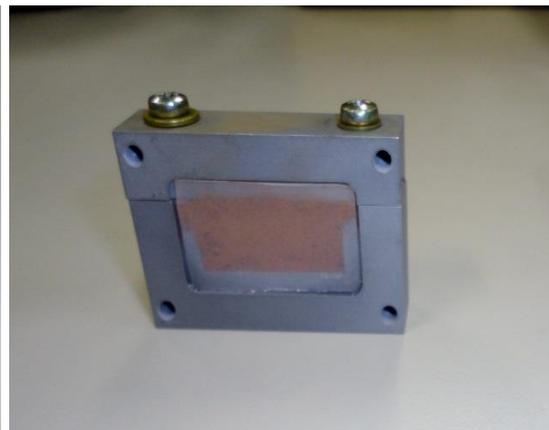
(c)

Figura 3.12. Etapas da compactação das amostras na guia de onda 1: (a) primeira camada compactada, (b) segunda camada compactada e (c) terceira camada compactada, regulada e contida pela parede de plástico.

Para as guias de onda 2 e 3 a preparação das amostras foi mais rápida, já que não teve a etapa da compactação. Assim, bastou-se colocar nas guias de onda a massa de solo necessária calculada para cada amostra e tampá-las com paredes de plástico (Figs. 3.13 e 3.14).

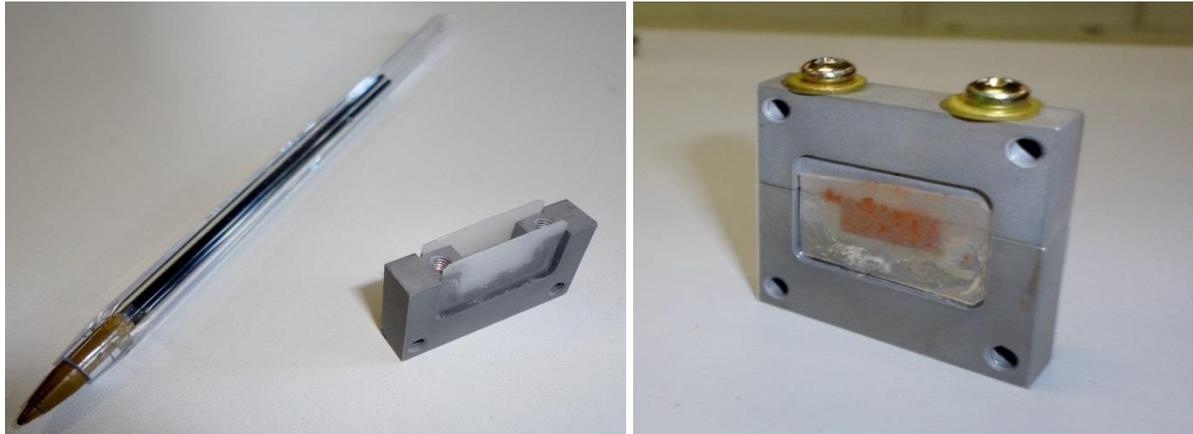


(a)



(b)

Figura 3.13. Preparação das amostras na guia de onda 2: (a) guia de onda 2 aberta com as duas paredes de plástico e (b) amostra dentro da guia de onda 2 fechada.



(a)

(b)

Figura 3.14. Preparação das amostras na guia de onda 3: (a) guia de onda 3 aberta com as duas paredes de plástico e (b) amostra dentro da guia de onda 3 fechada.

O teor de umidade final de cada amostra foi calculado à medida que as amostras iam sendo colocadas dentro das guias de onda, de acordo com a NBR 6457 (1986). Esse deveria ter valores iguais ou próximos aos valores do teor de umidade desejado. Os teores de umidade final foram medidos utilizando-se uma estufa a 110 °C e a balança da Fig. 3.8.

Por fim, as massas de cada guia de onda com as duas paredes de plástico e com as amostras foram obtidas na balança da Fig. 3.10. Assim, subtraindo-se estas massas pelas massas das respectivas guias de onda obteve-se a massa total de cada amostra dentro da guia de onda, conforme a Eq. 3.4 abaixo:

$$\left(\begin{array}{c} \text{massa total} \\ \text{da amostra} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{massa da guia de onda} \\ \text{com a amostra} \end{array} \right) - (\text{massa da guia de onda}) \quad (3.4)$$

3.3.5. CALIBRAÇÃO E MEDIÇÃO DOS PARÂMETROS-S DAS AMOSTRAS

A calibração e a medição dos parâmetros-S das amostras foram realizadas usando-se o VNA citado no item 3.3.1. A técnica escolhida para fazer estas medições foi a técnica de transmissão/reflexão, pois assim as amostras teriam dimensões limitadas pelas guias de onda e o ensaio seria mais fácil de ser controlado.

O método utilizado para calibrar o VNA foi o TRL (*Thru-Reflect-Line*). Para a calibração *Reflect* foram realizadas duas medições: *Open* e *Short*. Esta calibração do VNA foi executada para cada uma das três guias de onda e suas respectivas transições. Os

parâmetros-S de cada calibração ($[S]_T$ – *Thru*, $[S]_R$ – *Reflect* e $[S]_L$ – *Line*) foram convertidos em duas matrizes-T de erro das transições ($[T]_A$ e $[T]_B$).

Depois da preparação das amostras foram feitas as medições de amplitude e fase dos parâmetros-S não calibrados de cada amostra ($[S]_M$). A guia de onda com a amostra era colocada entre as transições (Fig. 3.15) e estas eram conectadas ao VNA por cabos coaxiais (Fig. 3.16). As leituras da amplitude e da fase foram obtidas diretamente do VNA.



(a)



(b)

Figura 3.15. Guias de onda preenchidas com as amostras e encaixadas entre as transições: (a) guia de onda 1 e (b) guias de onda 2 e 3.



Figura 3.16. Cabos coaxiais que conectam as transições com o VNA.

Em seguida, com a transformação das matrizes de parâmetros-S em matrizes do tipo ABCD (matrizes-T), foi utilizada a Eq. 2.17 para encontrar as matrizes-T calibradas do MUT ($[T]_{MUT}$). Logo depois, as matrizes $[T]_{MUT}$ foram novamente convertidas em matrizes calibradas de parâmetros-S do MUT ($[S]_{MUT}$), que é a matriz final desejada com a correção dos erros sistemáticos.

3.3.6. DETERMINAÇÃO DA CONSTANTE DIELÉTRICA E RELAÇÃO COM O ÍNDICE DE VAZIOS E A UMIDADE VOLUMÉTRICA DO SOLO

A constante dielétrica teórica das amostras ($\epsilon_{teórica}$) foi calculada utilizando-se a Eq. 2.20. As constantes dielétricas da água (ϵ_w), do ar (ϵ_{ar}) e da argila seca ($\epsilon_{arg.}$) foram retiradas da Tab. 2.2. Esta última tem valores que variam de 2 a 6, conforme Daniel (1996), e por isso, foi prevista uma faixa de valores para a constante dielétrica teórica das amostras, usando-se o valor mínimo e o máximo da constante dielétrica da argila. As frações de volume foram determinadas por meio de cálculos geotécnicos que levaram em conta o resultado obtido pelo ensaio de massa específica dos grãos do solo, a massa específica da água e parâmetros geotécnicos calculados durante a preparação das amostras no item 3.3.4. Além disso, a massa de ar foi considerada igual a zero, pois é desprezível em relação às massas de água e de sólidos. As Eqs. 3.5, 3.6, 3.7, 3.8, 3.9, 3.10, 3.11 e 3.12 mostram as fórmulas utilizadas para os cálculos geotécnicos.

$$m_w = m_t * \frac{w_f}{100 + w_f} \quad (3.5)$$

$$m_s = m_t - m_w \quad (3.6)$$

$$m_{ar} = 0 \quad (3.7)$$

$$V_w = \frac{m_w}{\rho_w} \quad (3.8)$$

$$V_s = \frac{m_s}{\rho_s} \quad (3.9)$$

$$V_{ar} = V_t - V_w - V_s \quad (3.10)$$

$$e = \frac{V_w + V_{ar}}{V_s} \quad (3.11)$$

$$\theta_v = \frac{V_w}{V_t} \quad (3.12)$$

Onde:

m_w = massa de água da amostra;

m_t = massa total da amostra;

w_f = teor de umidade final da amostra;

m_s = massa de sólidos da amostra;

m_{ar} = massa de ar da amostra;

V_w = volume de água da amostra;

ρ_w = massa específica da água;

V_s = volume de sólidos da amostra;

ρ_s = massa específica dos grãos do solo;

V_{ar} = volume de ar da amostra;

V_t = volume total da amostra = volume interno da guia de onda (V_g).

A constante dielétrica das amostras ($\epsilon_{\text{amostra}}$) foi determinada por meio dos parâmetros-S do MUT obtidos ($[S]_{\text{MUT}}$), resolvendo-se um sistema de equações que relacionam a constante dielétrica com os parâmetros-S das amostras. Este sistema de equações foi resolvido no *software* Matlab. O resultado obtido foi comparado com a faixa de valores (mínimo e máximo) da constante dielétrica teórica prevista pela Eq. 2.20 ($\epsilon_{\text{teór. mín.}}$ e $\epsilon_{\text{teór. máx.}}$).

Por sua vez, o índice de vazios das amostras (e_{amostra}) foi determinado pela Eq. 3.11. O índice de vazios teórico ($e_{\text{teórico}}$) foi calculado pela Eq. 2.23 utilizando-se a constante dielétrica das amostras ($\epsilon_{\text{amostra}}$) e a Eq. 3.12 para encontrar a umidade volumétrica (θ_v). Além disso, foram utilizadas as constantes dielétricas dos componentes (conforme a Tab. 2.2) e, devido à faixa de valores da constante dielétrica da argila, obteve-se um índice de vazios teórico mínimo e um máximo ($e_{\text{teór. mín.}}$ e $e_{\text{teór. máx.}}$). Assim, estes índices de vazios (teórico e da amostra) foram comparados entre si.

Pela Eq. 2.22 nota-se que a constante dielétrica é função de duas variáveis geotécnicas: índice de vazios e umidade volumétrica. Por isso, decidiu-se plotar esta equação no *software* Maple reproduzindo um gráfico tridimensional que relacionava os limites da constante dielétrica teórica com a umidade volumétrica e o índice de vazios das amostras. Outro gráfico tridimensional também foi feito no Maple para plotar pontos de cada amostra. Cada ponto representava a constante dielétrica da amostra para um par de valores de umidade volumétrica e índice de vazios da amostra.

Além dos gráficos tridimensionais, foi plotado também um gráfico bidimensional no programa Microsoft Excel relacionando-se as frequências utilizadas com as constantes dielétricas das amostras e com seus limites teóricos para os diversos teores de umidade utilizados.

4. RESULTADOS

Os ensaios descritos no Capítulo 3 anterior geraram resultados que fornecem informações geotécnicas e eletromagnéticas do solo testado. Estes resultados são expostos a seguir.

4.1. ENSAIOS DE MASSA ESPECÍFICA DOS GRÃOS E DE COMPACTAÇÃO

Conforme a NBR 6508 (1984), a determinação da massa específica dos grãos do solo (ρ_s) é dada pela Eq. 4.1.

$$\rho_s = \frac{M_1 \cdot \frac{100}{(100 + w_i)}}{\left[M_1 \cdot \frac{100}{(100 + w_i)} \right] + M_3 - M_2} \cdot \rho_T \quad (4.1)$$

Onde:

M_1 = massa do solo úmido;

M_2 = massa do picnômetro + solo + água, na temperatura T de ensaio;

M_3 = massa do picnômetro cheio de água até a marca de referência, na temperatura T de ensaio;

w_i = umidade inicial da amostra;

ρ_T = massa específica da água, na temperatura T de ensaio.

A partir dos dados obtidos pelo ensaio na Tab. 4.1 e utilizando-se a Eq. 4.1 obteve-se a massa específica média dos grãos do solo ($\rho_{s, \text{média}} = 2,67 \text{ g/cm}^3$).

Tabela 4.1. Determinação da massa específica dos grãos do solo.

h (%)	M_1 (g)	M_2 (g)	M_3 (g)	T (°C)	ρ_T (g/cm ³)	ρ_s (g/cm ³)	$\rho_{s, \text{média}}$ (g/cm ³)
9,70	50,03	695,07	666,48	24,4	0,9972	2,67	2,67
	50,02	706,58	678,04	24,4	0,9972	2,67	

No ensaio de compactação, a massa específica aparente seca é determinada de acordo com a Eq. 4.2, conforme a NBR 7182 (1986):

$$\rho_d = \frac{M_h \cdot 100}{V_c \cdot (100 + w)} \quad (4.2)$$

Onde:

ρ_d = massa específica aparente seca;

M_h = massa úmida do solo compactado;

V_c = volume útil do molde cilíndrico de compactação;

w = teor de umidade após a compactação;

Com os dados apresentados na Tab. 4.2 e utilizando-se a Eq. 4.2, determinaram-se as massas específicas aparentes secas (ρ_d) para cada umidade de compactação (w).

Tabela 4.2. Parâmetros geotécnicos obtidos no ensaio de compactação.

Amostras	w_h (%)	V_c (cm ³)	M_h (g)	w (%)	ρ_d (g/cm ³)
1 ^a	1,66	1002	1520	22,1	1,24
2 ^a		1000	1610	24,1	1,30
3 ^a		1000	1700	26,3	1,35
4 ^a	6,94	1002	1840	29,8	1,41
5 ^a		1000	1830	31,6	1,39
6 ^a		1000	1790	33,8	1,34

Notas: w_h = umidade higroscópica antes da compactação.

Assim, obteve-se a curva de compactação da argila coletada (Fig. 4.1). E de posse dos resultados dos ensaios de massa específica dos grãos e de compactação, a curva de saturação a 100% foi gerada (Fig. 4.1) de acordo com a Eq. 4.3 abaixo:

$$\rho_d = \frac{S}{\frac{w_a}{\rho_w} + \frac{S}{\rho_s}} \quad (4.3)$$

Onde:

S = grau de saturação 100% = 1;

w_a = teor de umidade arbitrado;

ρ_w = massa específica da água = 1,00 g/cm³;

A curva de compactação da argila coletada apresenta umidade ótima de 30,2% e massa específica aparente seca máxima de 1,42 g/cm³, aproximadamente.

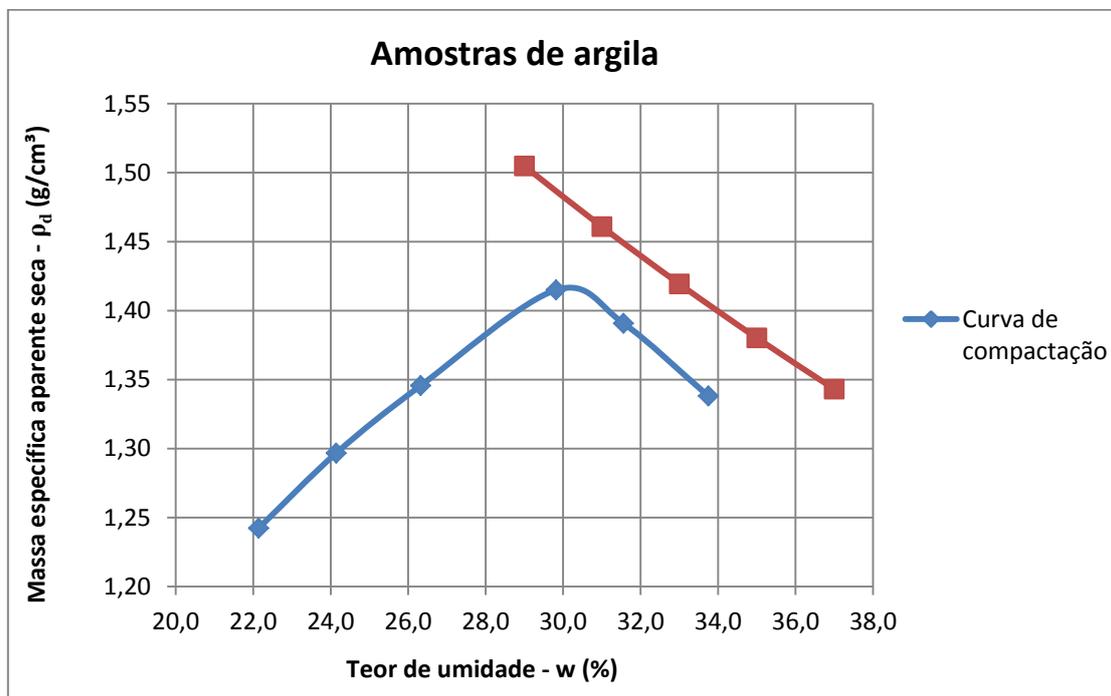


Figura 4.1. Curva de saturação e de compactação da porção de argila do solo coletado.

4.2. COMPRIMENTO DAS GUIAS DE ONDA

O comprimento das guias de onda (“L”) foi calculado pela Eq. 2.10 e o comprimento de onda guiada (λ_g) foi calculado pela Eq. 2.12. Considerando-se a velocidade da luz (c) igual a 29,929 cm/ns e tendo-se as frequências e as dimensões “a” e “b” de cada guia de onda, o comprimento das guias de onda foi encontrado e está apresentado na Tab. 4.3.

Tabela 4.3. Comprimento das guias de onda.

Guias de onda	Frequência escolhida (GHz)	Dimensão transversal interna		Comprimento de onda guiada	Comprimento L (cm)
		a (cm)	b (cm)	λ_g (cm)	
1	1,41	16,51	8,26	27,8	6,95
2	10,30	2,29	1,02	3,77	0,94
3	22,25	1,07	0,43	1,73	0,43

De acordo com os posicionamentos do pino central nas transições (Tab. 3.3), foi possível encontrar os fatores de forma geométricos correspondentes a cada guia de onda utilizada (Tab. 4.4).

Tabela 4.4. Fatores de forma de cada guia de onda utilizada.

Guias de onda	Fatores de forma		
	F ₁	F ₂	F ₃
1	0,43	0,35	0,06
2	0,43	0,43	0,22
3	0,43	0,40	0,50

4.3. NÚMERO DE GOLPES EM CADA CAMADA DA COMPACTAÇÃO

O número de golpes para cada uma das três camadas da compactação foi calculado utilizando-se a Eq. 3.1. Algumas incógnitas dessa equação foram estipuladas e outras foram calculadas com base em informações dadas. O peso do soquete (Tab. 4.5), por exemplo, foi calculado segundo a Eq. 4.4:

$$\text{peso do soquete} = \left(\begin{matrix} \text{volume do} \\ \text{soquete} \end{matrix} \right) \cdot \left(\begin{matrix} \text{peso específico} \\ \text{do aço} \end{matrix} \right) \quad (4.4)$$

Tabela 4.5. Peso do soquete.

Volume do soquete (m ³)	Peso específico do aço (kN/m ³)	Peso do soquete (kN)
7,51.10 ⁻⁴	78,48	5,90. 10 ⁻²

O volume do molde foi calculado segundo a Eq. 4.5:

$$\text{volume do molde} = a \cdot b \cdot L \quad (4.5)$$

As dimensões “a”, “b” e “L” da guia de onda 1 estão representadas na Tab. 4.6 abaixo, assim como o volume do molde.

Tabela 4.6. Volume do molde.

Guia de onda	a (m)	b (m)	L (m)	Volume do molde (m ³)
1	0,1651	0,0826	0,0695	9,47.10 ⁻⁴

A energia de compactação é dada pela Eq. 3.2. Nessa equação, a altura de queda do soquete e o número de camadas foram estipulados, conforme os valores da Tab. 4.7.

Tabela 4.7. Energia de compactação, altura de queda do soquete e número de camadas.

Energia de compactação (kN.m/m ³)	Altura de queda do soquete (m)	Número de camadas
594	0,1560	3

Portanto, utilizando-se os resultados das Tabs. 4.5, 4.6, 4.7 e substituindo-os na Eq. 3.1, obteve-se o número de golpes em cada camada aproximadamente igual a 20.

4.4. RESULTADOS OBTIDOS NA PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

Os teores de umidade inicial e final dos sacos e das amostras foram calculados e estão expostos na Tab. 4.8. De acordo com a Fig. 4.1 obteve-se o ponto da curva de compactação mais próximo da curva de saturação (com teor de umidade desejado igual a 31,6%) e, a partir da Eq. 4.3, foi determinado o seu grau de saturação ($S = 91,6\%$). O teor de umidade desejado natural foi estipulado em 24,1% (ponto conhecido e intermediário) com $S = 60,9\%$ (Tab. 4.8).

Tabela 4.8. Teores de umidade inicial e final.

Amostras	Teor de umidade inicial (%)	Teor de umidade final (%)	Teor de umidade desejado (%)
1.1	0,0	0,2	0,0
1.2		0,8	
1.3		0,8	
2.1	15,2	23,6	24,1
2.2		23,6	
2.3		23,6	
3.1	20,4	30,6	31,6
3.2		30,7	
3.3		30,7	

As quantidades de massa de solo necessárias para cada amostra foram calculadas de acordo com a Eq. 3.3 e estão representadas na Tab. 4.9. Nessa equação, foi utilizado o teor de umidade desejado, pois o teor de umidade final ainda não havia sido obtido. E particularmente para a guia de onda 1, também foi calculada a massa de solo necessária para cada uma das três camadas, dividindo-se m_n por 3. O volume interno das guias de onda foi calculado segundo a Eq. 4.5.

Tabela 4.9. Volume interno das guias de onda e massa de solo necessária para cada guia de onda.

Amostras	Volume interno da guia de onda	Teor de umidade desejado	Massa específica aparente seca	Massa de solo necessária em cada guia de onda
	V_g (cm ³)	w_d (%)	ρ_d (g/cm ³)	m_n (g)
1.1	947	0,0	1,23	1165
2.1		24,1	1,30	1527
3.1		31,6	1,39	1732
1.2	2,19	0,0	1,23	2,70
2.2		24,1	1,30	3,54
3.2		31,6	1,39	4,01
1.3	0,20	0,0	1,23	0,25
2.3		24,1	1,30	0,32
3.3		31,6	1,39	0,37

Para o cálculo da massa da amostra em cada guia de onda foram obtidas as massas das guias de onda sem as amostras e das guias de onda com as amostras, ambas contabilizando também as duas paredes de plástico. E, a partir da Eq. 4.6, foi obtido o resultado da Tab. 4.10.

$$\left(\begin{array}{c} \text{massa total} \\ \text{da amostra} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{massa da guia de onda} \\ \text{com a amostra} \end{array} \right) - (\text{massa da guia de onda}) \quad (4.6)$$

Tabela 4.10. Massa total das amostras em cada guia de onda.

Amostras	Massa da guia de onda (g)	Massa da guia de onda com a amostra (g)	Massa total da amostra (g)
1.1	2050	3235	1185
2.1	2095	3505	1410
3.1	2095	3800	1705
1.2	29,85	32,62	2,77
2.2	29,84	33,37	3,53
3.2	30,10	34,12	4,02
1.3	14,96	15,22	0,26
2.3	14,95	15,25	0,30
3.3	15,16	15,49	0,33

4.5. PARÂMETROS-S DA CALIBRAÇÃO E DAS AMOSTRAS

Os parâmetros-S obtidos da calibração TRL ($[S]_T$, $[S]_R$ e $[S]_L$) e os parâmetros-S não calibrados das amostras de argila ($[S]_M$) estão expostos nas Tabs. 4.11, 4.12 e 4.13 abaixo, em função das fases e das amplitudes lidas diretamente no VNA.

Tabela 4.11. Parâmetros-S da calibração – *Thru e Line*.

Guias de onda	S_{ij}	THRU		LINE	
		Amplitude (dB)	Fase (°)	Amplitude (dB)	Fase (°)
1	S_{11}	-1,50	-104,80	-5,71	-126,00
	S_{22}	-1,45	-104,50	-5,78	-125,50
	S_{21}	-4,47	164,50	-1,66	95,75
	S_{12}	-4,46	163,90	-1,71	95,21
2	S_{11}	-4,13	23,20	-1,09	-45,40
	S_{22}	-3,99	15,90	-0,92	-43,90
	S_{21}	-2,47	109,90	-7,40	45,30
	S_{12}	-2,50	109,70	-7,40	45,60
3	S_{11}	-14,39	-27,00	-7,12	-89,50
	S_{22}	-14,16	-75,00	-7,11	-101,00
	S_{21}	-0,84	47,20	-2,17	-8,00
	S_{12}	-0,83	47,20	-2,16	-8,30

Tabela 4.12. Parâmetros-S da calibração – *Reflect (Short e Open)*.

Guias de onda	S_{ij}	REFLECT (OPEN)		REFLECT (SHORT)	
		Amplitude (dB)	Fase (°)	Amplitude (dB)	Fase (°)
1	S_{11}	-6,69	-156,30	0,15	-68,51
	S_{22}	-6,80	-133,90	0,38	-68,53
	S_{21}	-80,00	0,00	-80,00	0,00
	S_{12}	-80,00	0,00	-80,00	0,00
2	S_{11}	-3,31	-17,50	-0,50	-30,70
	S_{22}	-2,79	-19,70	0,00	-32,00
	S_{21}	-80,00	0,00	-80,00	0,00
	S_{12}	-80,00	0,00	-80,00	0,00
3	S_{11}	-10,10	-33,00	-0,11	-125,70
	S_{22}	-10,10	-44,00	-0,20	-122,70
	S_{21}	-80,00	0,00	-80,00	0,00
	S_{12}	-80,00	0,00	-80,00	0,00

Tabela 4.13. Parâmetros-S não calibrados das amostras.

Guias de onda	S _{ij}	Saco 1		Saco 2		Saco 3	
		Amplitude (dB)	Fase (°)	Amplitude (dB)	Fase (°)	Amplitude (dB)	Fase (°)
1	S ₁₁	-3,19	-116,50	-4,19	-68,84	-1,87	-70,40
	S ₂₂	-2,94	-117,20	-3,45	-67,88	-1,88	-70,70
	S ₂₁	-4,39	-26,10	-9,24	67,98	-13,62	-134,50
	S ₁₂	-4,41	-26,67	-9,22	67,50	-13,57	-135,20
2	S ₁₁	-1,67	-8,20	-1,00	-37,50	-0,97	-39,20
	S ₂₂	-1,48	-10,00	-0,71	-37,80	-0,81	-37,40
	S ₂₁	-6,80	-93,70	-25,70	75,80	-31,45	-48,50
	S ₁₂	-6,80	-93,80	-25,70	75,90	-31,50	-48,30
3	S ₁₁	-9,07	-51,70	-4,90	-125,50	-4,04	-130,20
	S ₂₂	-8,70	-70,80	-4,30	-130,20	-3,45	-128,00
	S ₂₁	-2,10	-140,00	-11,04	145,60	-22,27	12,30
	S ₁₂	-2,10	-140,00	-10,77	144,80	-22,18	11,80

4.6. CARACTERIZAÇÃO ELETROMAGNÉTICA E GEOTÉCNICA DO SOLO

Para a realização dos cálculos das quantidades de massa e volume de água, ar e solo das amostras foram utilizadas algumas informações já obtidas anteriormente como a massa específica dos grãos do solo (Tab. 4.1), o teor de umidade final das amostras (Tab. 4.8), o volume interno das guias de onda (Tab. 4.9) e a massa total das amostras (Tab. 4.10). Além disso, a massa específica da água foi considerada igual a 1,00 g/cm³ e a massa de ar igual a zero. Desta forma, as massas e os volumes de cada componente da amostra foram obtidos pelas Eqs. 3.5, 3.6, 3.7, 3.8, 3.9 e 3.10 e estão apresentadas na Tab. 4.14 abaixo:

Tabela 4.14. Massa e volume de cada componente das amostras.

Amostras	Massa de água	Massa de sólidos	Massa de ar	Massa total	Volume de água	Volume de sólidos	Volume de ar	Volume total
	m _w (g)	m _s (g)	m _{ar} (g)	m _t (g)	V _w (cm ³)	V _s (cm ³)	V _{ar} (cm ³)	V _t (cm ³)
1.1	2,04	1183	0,00	1185	2,04	443,06	502	947
2.1	269,05	1141		1410	269,05	427,32	250	947
3.1	399,13	1306		1705	399,13	489,09	59	947
1.2	0,02	2,75	0,00	2,77	0,02	1,03	1,14	2,19
2.2	0,68	2,86		3,53	0,68	1,07	0,45	2,19
3.2	0,95	3,07		4,02	0,95	1,15	0,10	2,19
1.3	2.10 ⁻³	0,26	0,00	0,26	2.10 ⁻³	0,10	0,10	0,20
2.3	0,06	0,24		0,30	0,06	0,09	0,05	0,20
3.3	0,08	0,25		0,33	0,08	0,09	0,03	0,20

A constante dielétrica de cada componente (Tab. 4.15) foi retirada da Tab. 2.2.

Tabela 4.15. Constante dielétrica utilizada para cada material.

Material	Constante dielétrica	
Ar	$\epsilon_{ar} = 1$	Davis and Annan (1989)
Água fresca	$\epsilon_w = 80$	Davis and Annan (1989)
Argila seca	$\epsilon_{arg. \text{mín.}} = 2$	Daniels (1996)
	$\epsilon_{arg. \text{máx.}} = 6$	Daniels (1996)

Substituindo-se os dados das Tabs. 4.14 e 4.15 na Eq. 2.20 obteve-se a faixa de valores da constante dielétrica teórica. Estes valores foram comparados com os valores da constante dielétrica das amostras (Tab. 4.16). A umidade volumétrica e os índices de vazios (teóricos e das amostras) estão apresentados na Tab. 4.17.

Tabela 4.16. Constante dielétrica teórica e das amostras.

Amostras	Constante dielétrica teórica		Constante dielétrica das amostras
	$\epsilon_{teór. \text{mín.}}$	$\epsilon_{teór. \text{máx.}}$	$\epsilon_{amostra}$
1.1	1,47	2,87	1,95
1.2	1,61	3,09	2,10
1.3	1,64	3,18	2,20
2.1	11,86	15,30	12,30
2.2	13,30	17,23	12,90
2.3	11,89	15,36	13,04
3.1	20,82	25,99	22,12
3.2	21,54	26,88	20,04
3.3	19,88	24,77	20,75

Tabela 4.17. Umidade volumétrica e índice de vazios teóricos e das amostras.

Amostras	Umidade volumétrica	Índice de vazios teórico		Índice de vazios das amostras
	θ_v	$\epsilon_{teór. \text{mín.}}$	$\epsilon_{teór. \text{máx.}}$	$\epsilon_{amostra}$
1.1	0,002	0,09	2,82	1,14
1.2	0,010	0,11	2,89	1,13
1.3	0,010	0,03	2,59	1,06
2.1	0,284	0,66	4,81	1,22
2.2	0,308	1,83	8,90	1,05
2.3	0,285	0,19	3,18	1,19
3.1	0,422	0,17	3,09	0,94
3.2	0,431	6,77	26,20	0,90
3.3	0,410	0,39	3,86	0,99

Juntando-se os dados obtidos e apresentados na Tab. 4.18, foi possível elaborar os gráficos das Figs. 4.2, 4.3 e 4.4 que relacionam a constante dielétrica com a frequência utilizada, com o índice de vazios e com a umidade volumétrica das amostras de argila.

Tabela 4.18. Frequência utilizada, teor de umidade final, umidade volumétrica, índice de vazios e constante dielétrica teórica e das amostras.

Amostras	Frequência utilizada (GHz)	Teor de umidade final (%)	Umidade volumétrica	Índice de vazios das amostras	Constante dielétrica das amostras	Constante dielétrica teórica	
			θ_v	$\epsilon_{amostra}$	$\epsilon_{amostra}$	$\epsilon_{teór. mín.}$	$\epsilon_{teór. máx.}$
1.1	1,50	0,2	0,002	1,14	1,95	1,47	2,87
1.2	10,00	0,8	0,010	1,13	2,10	1,61	3,09
1.3	20,00	0,8	0,010	1,06	2,20	1,64	3,18
2.1	1,50	23,6	0,284	1,22	12,30	11,86	15,30
2.2	10,00	23,6	0,308	1,05	12,90	13,30	17,23
2.3	20,00	23,6	0,285	1,19	13,04	11,89	15,36
3.1	1,50	30,6	0,422	0,94	22,12	20,82	25,99
3.2	10,00	30,7	0,431	0,90	20,04	21,54	26,88
3.3	20,00	30,7	0,410	0,99	20,75	19,88	24,77

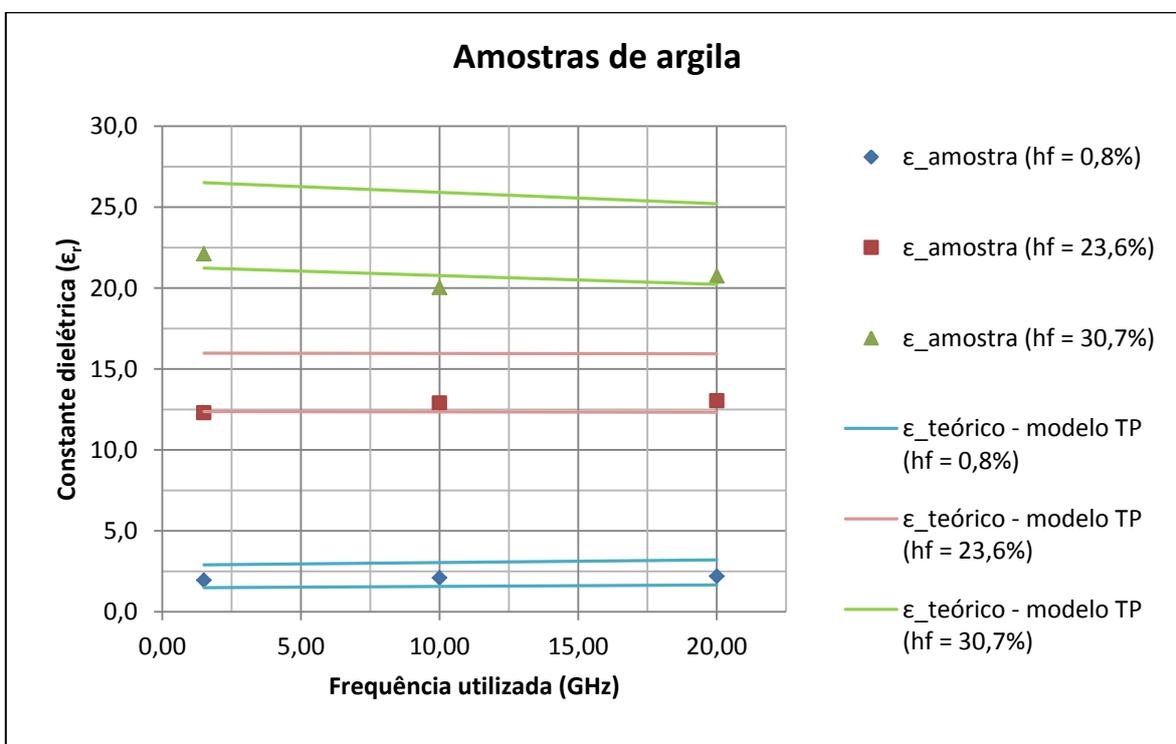


Figura 4.2. Gráfico da constante dielétrica *versus* a frequência utilizada para amostras de argila com diferentes teores de umidade.

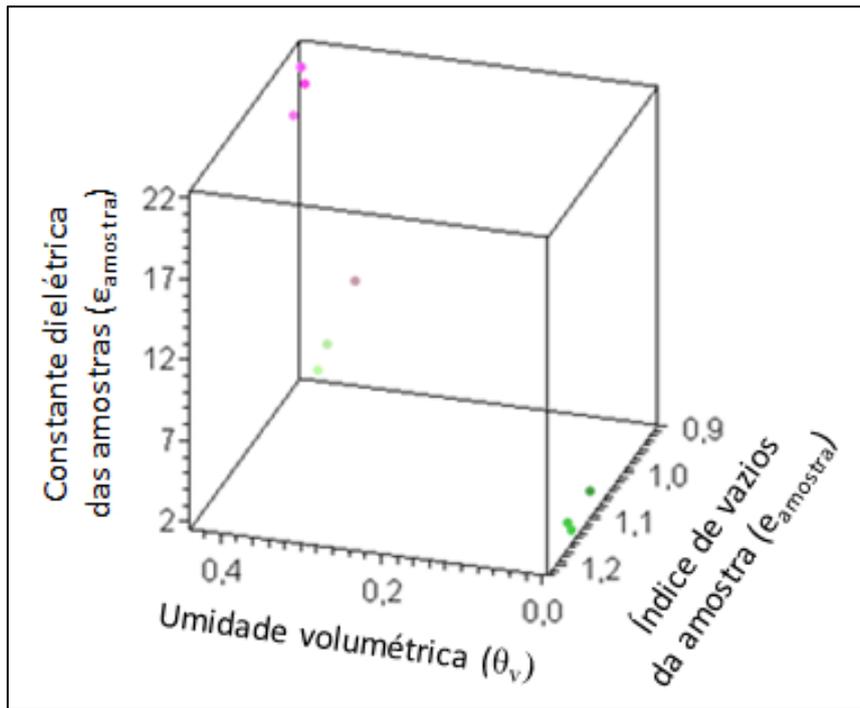


Figura 4.3. Gráfico 3-D: constante dielétrica das amostras *versus* índice de vazios das amostras *versus* umidade volumétrica.

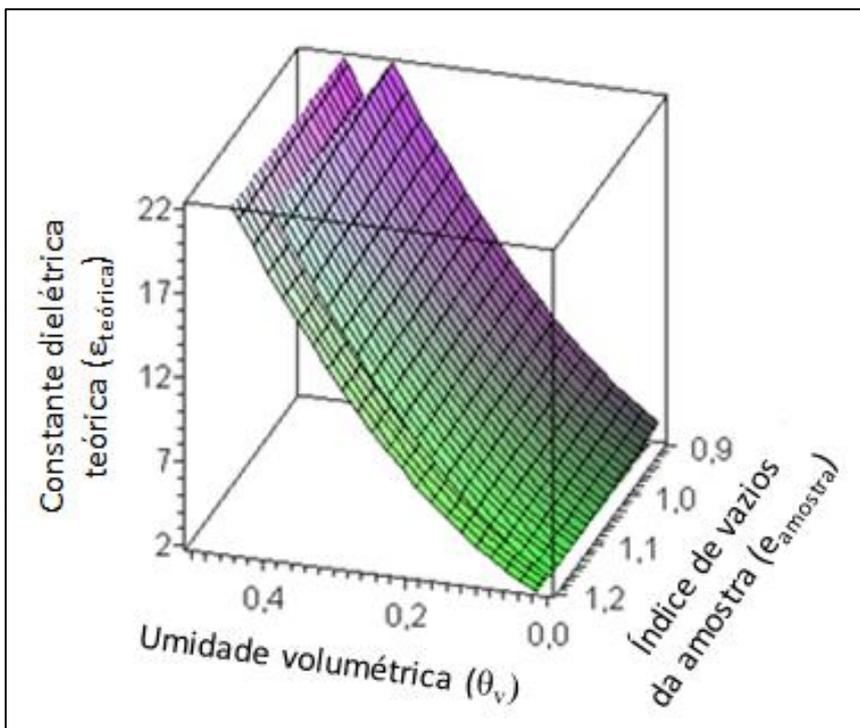


Figura 4.4. Gráfico 3-D: constante dielétrica teórica *versus* índice de vazios das amostras *versus* umidade volumétrica.

5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Segundo Pinto (2006), de uma forma geral, os solos argilosos normalmente apresentam massa específica seca máxima baixa (valores variando entre 1,4 g/cm³ e 1,5 g/cm³) e umidade ótima elevada (valores entre 25% e 30%). Analisando-se a curva de compactação gerada para a argila utilizada (Fig. 4.1), os valores obtidos da umidade ótima (30,2%) e da massa específica seca máxima (1,42 g/cm³) são condizentes com os valores citados por Pinto (2006) para este tipo de solo. O ponto da curva de compactação mais próximo da curva de saturação é o ponto com teor de umidade igual a 31,6% e saturação de 91,6%. Ou seja, a saturação máxima do solo estudado é de 91,6%, já que a saturação de 100% é inviável, pois não é possível expulsar todo o ar existente no solo. Na preparação das amostras, os teores de umidade final calculados tiveram valores muito próximos dos teores de umidade desejados (Tab. 4.8).

A massa total das amostras (Tab. 4.10) deveria ser igual à massa de solo necessária em cada guia de onda (Tab. 4.9). O resultado foi muito próximo e todas as amostras apresentaram diferenças entre os valores menores do que 10%, exceto a amostra 3.3 que teve uma diferença de aproximadamente 12%, o que é bem razoável levando-se em conta a dificuldade da precisão desses resultados durante a preparação das amostras.

Na calibração TRL os parâmetros-S de transmissão da calibração *Reflect* (Tab. 4.12) apresentaram valores de amplitude muito abaixo do nível de ruído do analisador de rede que é em torno de -65,00 dB. Isso aconteceu devido à voltagem transmitida ser nula para esta calibração. Para a realização dos cálculos, os valores de amplitude obtidos foram considerados iguais a -80,00 dB.

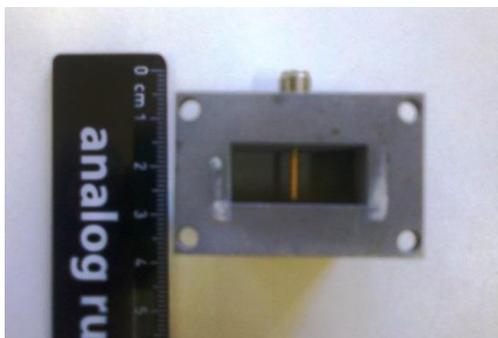
A Tab. 4.13 apresenta os resultados dos parâmetros-S não calibrados das amostras ($[S]_M$). A amplitude e a fase dos parâmetros-S de reflexão (S_{11} e S_{22}) das ondas eletromagnéticas incidentes no MUT não apresentaram valores iguais, segundo previa a simetria considerada do sistema (isso já era esperado, pois é muito difícil obter valores exatamente iguais neste tipo de medição). Assim, os parâmetros-S utilizados foram aproximados para a média geométrica entre estes dois valores diferentes medidos de S_{11} e S_{22} . A mesma consideração foi feita para os parâmetros S_{12} e S_{21} de transmissão.

Alguns erros nas medições estão relacionados aos fatores de forma geométricos das transições das guias de onda. Quanto menor for o valor de F_1 e maior forem os valores de F_2 e F_3 , estes erros serão menores e minimizados. Dito isso, analisando-se os fatores de forma obtidos na Tab. 4.4, observa-se que F_1 é igual para todas as guias de onda ($F_1 = 0,43$) e seu

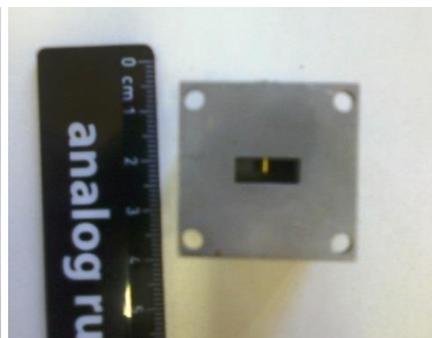
valor é um pouco alto, o que não é bom, pois assim o pino central dessas guias de onda (Fig. 5.1) causa uma obstrução maior da corrente elétrica quando esta estiver entrando pela cabeça do pino para se propagar na transição. O fator de forma F_2 é um pouco maior para a guia de onda 2, com um valor de 0,43 contra um valor de 0,35 para a guia de onda 1 e 0,40 para a guia de onda 3. Ou seja, apesar da diferença entre os valores ser pequena, a transição da guia de onda 2 possui a extremidade do pino central relativamente mais afastada da parede lateral (Fig. e, como consequência, seu comprimento é menor. Isso é bom, pois assim este pino tem menos risco de apresentar desalinhamento em seu eixo. Já o fator de forma F_3 teve valor maior para a guia de onda 3 (valor obtido igual a 0,50), enquanto que para a guia de onda 2 o valor obtido foi de 0,22 e para a guia de onda 1 foi de 0,06. Desta forma, o pino central inserido na transição da guia de onda 3 possui uma relação entre seu diâmetro e seu comprimento maior do que a das outras guias de onda, o que é muito bom já que a possibilidade de desalinhamento do eixo do pino também diminui neste caso. A diferença entre os valores dos fatores de forma F_3 foi consideravelmente grande, principalmente entre a guia de onda 1 e a guia de onda 3.



(a)



(b)



(c)

Figura 5.1. Pino central nas transições: (a) da guia de onda 1, (b) da guia de onda 2 e (c) da guia de onda 3.

Após a análise feita sobre os fatores de forma, observa-se que a transição da guia de onda 3 é a que menos gera erros devido ao posicionamento do pino central. E a transição da guia de onda 1 é a que mais gera estes erros. Ou seja, esses erros serão diferentes para variados tamanhos de guias de onda e, conseqüentemente, diversos valores de fatores de forma. A correção desses erros foi realizada utilizando-se o método dos elementos finitos de tal modo que o pino central estivesse supostamente posicionado de maneira correta (sem desalinhamentos) para ajustar os valores obtidos das matrizes $[S]_M$.

Outras possíveis fontes de erro foram o modo de preparo diferente de cada amostra e a precisão na confecção das guias de onda. Somente as amostras da guia de onda 1 foram compactadas na energia de Proctor Normal. As outras amostras foram colocadas manualmente nas guias de onda 2 e 3 devido às suas dimensões muito pequenas. Estes erros também foram considerados nas correções feitas.

Na Tab. 4.16 pode-se observar que o resultado obtido da constante dielétrica das amostras nas medições está compreendido entre os limites mínimos e máximos da constante dielétrica teórica, exceto as amostras 2.2 e 3.2. Do mesmo modo, na Tab. 4.17 os valores do índice de vazios das amostras estão compreendidos entre os valores mínimos e máximos do índice de vazios teórico, também com exceção das amostras 2.2 e 3.2. Ou seja, os resultados são bastante razoáveis se comparados entre si, mas as amostras 2.2 e 3.2 tiveram certo desvio em relação às medidas teóricas (provavelmente devido à dificuldade em suas preparações, por terem dimensões muito pequenas) e poderiam até ser desconsideradas. Porém, não foram, pois o desvio medido não foi visto como uma discrepância relevante.

Outro aspecto que pode ser notado é que nas Tabs. 4.16 e 4.17 a constante dielétrica e o índice de vazios das amostras que têm mesmo teor de umidade apresentaram resultados muito semelhantes entre si, o que era de se esperar tendo em vista que essas amostras estavam, teoricamente, em mesmas condições de umidade e de compactação.

No gráfico da Fig. 4.2, para as amostras com mesmo teor de umidade final verifica-se uma variação muito suave da constante dielétrica das amostras em relação à frequência utilizada. Ou seja, as constantes dielétricas das amostras são praticamente independentes das frequências utilizadas no experimento. Isso reforça o estudo feito por Knoll (1996) com amostras de argila utilizando-se frequências bem menores (de 10 kHz a 10 MHz) onde a constante dielétrica tendia a uma constância à medida que a frequência utilizada aumentava (Fig. 2.15 (b)). Como a frequência utilizada no experimento da pesquisa atual foi entre 1,50 GHz e 20,00 GHz, a tendência vista no trabalho de Knoll (1996) se confirmou.

Nas Figs. 4.3 e 4.4 os gráficos revelam uma relação interdependente entre a constante dielétrica, a umidade volumétrica e o índice de vazios teórico e das amostras, conforme a Eq. 2.22. Ou seja, diferentemente do estudo feito por Knoll (1996) onde ele faz uma análise gráfica bidimensional, aqui foi feita uma análise tridimensional devido a essa interdependência. Outra informação interessante obtida é que para um mesmo índice de vazios, a constante dielétrica aumenta à medida que a umidade volumétrica aumenta. Isso também faz muito sentido já que para um mesmo índice de vazios, se aumentarmos a umidade volumétrica, aumentamos a quantidade de água na amostra e, como a constante dielétrica da água é alta ($\epsilon_w = 80$), isso faz com que a constante dielétrica do material também aumente como um todo, de acordo com a Eq. 2.20. Desta forma, observou-se que a quantidade de água na amostra é quem tem mais influência no valor da constante dielétrica.

As constantes dielétricas das amostras na Fig. 4.3 encontram-se razoavelmente entre as curvas dos limites mínimos e máximos das constantes dielétricas teóricas (Fig. 4.4). Isso quer dizer que os resultados dos ensaios foram coerentes com os valores teóricos obtidos.

Assim, foi possível obter uma relação entre as constantes dielétricas, os índices de vazios e as umidades volumétricas da argila de Brasília para medições feitas na faixa de frequência entre 1,50 GHz e 20,00 GHz.

6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Este trabalho apresentou resultados importantes sobre a caracterização eletromagnética da argila de Brasília associada a parâmetros geotécnicos. Com os resultados obtidos nesta pesquisa, foi possível criar um banco de dados inicial relacionando-se a constante dielétrica deste tipo de solo no Brasil com seu índice de vazios e sua umidade volumétrica para medições feitas com um VNA, utilizando-se frequências de 1,50 GHz a 20,00 GHz. Essa correspondência é valiosa, pois futuramente, quando forem obtidas mais informações para acrescentar a este banco de dados, espera-se criar uma tabela que correlacione diretamente o índice de vazios e a umidade volumétrica de uma amostra de argila a partir dos valores de sua constante dielétrica.

Após a criação de um banco de dados que será gerado através de resultados obtidos nesta pesquisa e em pesquisas posteriores, a ideia é utilizar essas informações para desenvolver um sensor eletromagnético (com aplicação em campo) que relacione diretamente a constante dielétrica de um material com parâmetros geotécnicos. Ou seja, ao fazer uma investigação geotécnica em campo utilizando-se este sensor eletromagnético, os dados geotécnicos do solo seriam obtidos no mesmo instante da investigação.

Algumas vantagens deste sensor eletromagnético seriam: a redução do tempo de investigação geotécnica; a obtenção praticamente instantânea de parâmetros geotécnicos do solo em estudo; a automação do procedimento, evitando-se erro humano e oferecendo maior segurança; a facilidade da entrada do sensor em furos de sondagem; a facilidade da portabilidade deste sensor para o campo; e a não-destrutibilidade deste método, causando-se menor impacto ambiental.

Algumas sugestões interessantes para melhorar os resultados obtidos e que podem ser aplicadas em trabalhos futuros sobre o assunto são citadas a seguir:

- A utilização de frequências altas nos experimentos feitos (maiores do que as frequências normalmente utilizadas em outros métodos geotécnicos) ajuda a obter uma maior resolução (detalhamento) do solo, apesar da perda de alcance de profundidade atingida pela onda eletromagnética. Porém, quanto maior for a frequência utilizada, menor será a dimensão das guias de onda. Então, antes de escolher a frequência definitiva do experimento, recomenda-se analisar cuidadosamente o tamanho das amostras e se suas dimensões não serão muito pequenas para conseguir controlar seus aspectos geotécnicos e para prepara-las de modo que caibam precisamente dentro da guia de onda. A dificuldade de precisão na

confeção de guias de onda muito pequenas também pode influenciar na decisão sobre uma frequência muito alta a ser utilizada;

- Juntamente com a análise da frequência a ser utilizada, é importante fazer a análise dos fatores geométricos da guia de onda de modo que sua escolha procure minimizar os erros de posicionamento do pino central;
- O modo de preparo das amostras foi diferente. Apenas para as amostras da guia de onda 1 foi feita a compactação com um novo soquete dimensionado. Se possível, seria melhor que todas as amostras sejam preparadas da mesma maneira, com a mesma energia de compactação, para que as condições de ensaio sejam mais semelhantes;
- Nesta pesquisa foi observada certa independência da constante dielétrica das amostras com a frequência utilizada. Seria interessante testar também outras frequências para analisar se essa relação continuaria independente.
- Outra sugestão seria utilizar mais amostras para cada guia de onda com diversos teores de umidade nos experimentos. Assim, seriam obtidos mais pontos para plotar os gráficos apresentados aqui neste trabalho;
- A princípio, resolveu-se criar um banco de dados de características eletromagnéticas e geotécnicas apenas para a argila. Porém, a ideia é que futuramente criem-se bancos de dados para todos os tipos de solo (argila, silte e areia).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGILENT TECHNOLOGIES (2005). Basics of Measuring the Dielectric Properties of Material. Application note 1217-1. 5989-2589EN, USA.
- AKBAS, H., TURKEL, V. e YALCINKAYA, M. (2009). Detection Methods of Underground Pipelines. 24th World Gas Conference (WGC), Buenos Aires, Argentina.
- ASTM D2488 (2009). Standard Practice for Description and Identification of Soils (Visual-Manual Procedure).
- ASTM D6432 (2011). Standard Guide for Using the Surface Ground Penetrating Radar Method for Subsurface Investigation.
- BLONQUIST JR., J. M., JONES, S. B. and ROBINSON, D. A. (2005). A Time Domain Transmission Sensor with TDR Performance Characteristics. Journal of Hydrology. Vol. 314, p. 235-245, Utah, USA.
- BRITO, S. N. A. e OLIVEIRA, A. M. S. (1998). Geologia de Engenharia. Associação Brasileira de Geologia de Engenharia (ABGE), São Paulo, SP.
- BÜYÜKÖZTÜRK, O., YU, T. Y. e ORTEGA, J. A. (2006). A Methodology for Determining Complex Permittivity of Construction Materials Based on Transmission-Only Coherent, Wide-Bandwidth Free-Space Measurements. Cement & Concrete Composites. Vol. 28, p. 349 – 359, Massachusetts, USA.
- CALLISTER, W. D. e RETHWISCH, D. G. (2009). Materials Science and Engineering: an Introduction. 8th edition, John Wiley & Sons, USA.
- DANIELS, D. J. (1996). Surface-Penetrating Radar – IEE Radar, Sonar, Navigation and Avionics Series 6: London, The Institute of Electrical Engineers, 320 p.
- DAS, B. M. (2007). Fundamentos de Engenharia Geotécnica. Tradução da 6^a Edição norte-americana, Thomson.
- DAVIS, J. L. & ANNAN, A. P. (1989). Ground-Penetrating Radar for High-Resolution Mapping of Soil and Rock Stratigraphy: Geophysical Prospecting, Vol. 37, p. 531-551.
- EBARA, H., INOUE, T. e HASHIMOTO, O. (2006). Measurement Method of Complex Permittivity and Permeability for Powdered Material Using a Waveguide in Microwave Band. Science and Technology of Advanced Materials, Vol. 7, p. 77-83.
- FLEURY, J. e BERNARD, O. (2003). Designing and Characterizing TRL Fixture Calibration Standards for Device Modeling. Application Note 1041, California Eastern Laboratories (CEL), California, USA.

- FOUCHÉ, C. (2006). Elliptical Applicator Design through Analysis, Modelling and Material Property Knowledge. Dissertação de Mestrado em Engenharia, University of Stellenbosch, Cabo Ocidental, África do Sul.
- JARVIS, J. B. (1990). Transmission/Reflection and Short-Circuit Line Permittivity Measurements. National Institute of Standards and Technology (NIST), Technical Note 1341, Colorado, USA.
- JOL, H. M. (2009). Ground Penetrating Radar: Theory and Applications. Elsevier Science. University of Wisconsin – Eau Claire, USA, p. xiii.
- KNIGHT, Rosemary (2001). Ground Penetrating Radar for Environmental Applications. Annual Review of Earth and Planetary Sciences. Vol. 29, p. 229-255, Vancouver, Canada.
- KNOLL, M. D. (1996). A Petrophysical Basis for Ground Penetrating Radar and Very Early Time Electromagnetics: Electrical Properties of Sand-Clay Mixtures. Doctoral Thesis, Department of Earth and Ocean Sciences, The University of British Columbia. Vancouver, Canada.
- KUBACKI, R., NOWOSIELSKI, L. e PRZESMYCKI, R. (2011). The Improved Technique of Electric and Magnetic Parameters Measurements of Powdered Materials. Advances in Engineering Software, Vol. 42, Issue 11, p. 911-916, Polônia.
- LAST, G. V., MURRAY, C. J. e TRUEX, M. J. (2005). Review of Geophysical Techniques to Define the Spatial Distribution of Subsurface Properties or Contaminants. Pacific Northwest National Laboratory (PNNL-15305). Richland, Washington, USA.
- LICHTNECKER, K. & ROTHER, K. (1937). Die Herleitung des Logarithmischen Mischungsgesetz es aus Allgemeinen. Prinzipien der Stationären Strömung: Physikalische Zeitschrift, V. 32, p. 255-260.
- LUDWIG, R., GERHARDS, H., KLENK, P., WOLLSCHLÄGER, U. e BUCHNER, J. (2011). Electromagnetic Methods in Applied Geophysics. Practical Course Environmental Physics. Institute of Environmental Physics Heidelberg University. Heidelberg, Baden Württemberg, Germany.
- MARTINEZ, A. e BYRNES, A. P. (2001). Modeling Dielectric-Constant Values of Geologic Materials: An Aid to Ground-Penetrating Radar Data Collection and Interpretation. Kansas Geological Survey, Current Research in Earth Sciences, Bulletin 247, part I, Kansas, USA.
- MATTHEWS, P. J. e SONG, J. J. (1993). RF Impedance Measurement Calibration. Argonne National Laboratory, Light Source Note 223, Illinois, USA.
- MEEHAN, C. L. & HERTZ, J. S. (2011). Using Electrical Density Gauges for Field Compaction Control. Report of the Delaware Center for Transportation (DCT), N° DCT 220, Civil and Environmental Engineering, University of Delaware, Delaware, USA, 149 p.

- MOJID, M. A. e CHO, H. (2004). Evaluation of the Time-Domain Reflectometry (TDR) – Measured Composite Dielectric Constant of Root-Mixed Soils for Estimating Soil-Water Content and Root Density. *Journal of Hydrology*. Vol. 295, p. 263-275, Mymensingh, Bangladesh.
- MOTA, N. M. B. (2003). *Ensaio Avançados de Campo na Argila Porosa Não-Saturada de Brasília: Interpretação e Aplicação em Projetos de Fundação*. Tese de Doutorado, Publicação G.TD – 013A/03, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, p. 335.
- NABIGHIAN, M. N. (1991). *Electromagnetic Methods in Applied Geophysics. Volume 2, Application, Parts A and B. Investigations in Geophysics N° 3*. Society of Exploration Geophysics, USA, p. 5.
- NASHAIT, A. F. e SEGER, M. A. (2011). Detection of Water-Table by Using Ground Penetration Radar (GPR). *Engineering & Technology Journal*, Vol. 29, Issue 3, p. 554-566, Iraque.
- NBR 6457 (1986). *Amostras de Solo – Preparação para Ensaio de Compactação e Ensaio de Caracterização*.
- NBR 6508 (1984). *Grãos de Solo que Passam na Peneira de 4,8 mm – Determinação da Massa Específica*.
- NBR 7182 (1986). *Solo – Ensaio de Compactação*.
- NOBORIO, K. (2001). Measurement of Soil Water Content and Electrical Conductivity by Time Domain Reflectometry: a Review. *Computers and Electronics in Agriculture*, Vol. 31, p. 213-237, Iowa, USA.
- ORFANIDIS, S. J. (2010). *Electromagnetic Waves and Antennas*. Rutgers University, New Jersey, USA.
- PEREIRA, J. J. (2007). *Caracterização Eletromagnética de Materiais Absorvedores de Microondas via Medidas de Permissividade e Permeabilidade Complexas na Banda X*. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Taubaté, Taubaté, SP.
- PINTO, C. S. (2006). *Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 Aulas. 3ª Edição*. Oficina de textos, São Paulo.
- POZAR, D. M. (2003). *Microwave Engineering*, 2nd edition, USA, p. 706.
- RADMANESH, M. M. (2009). *Advanced RF & Microwave Circuit Design (The Ultimate Guide to Superior Design)*. Livro impresso em Indiana, USA.
- ROBINSON, D., JONES, S., WRAITH, J., OR, D. e FRIEDMAN, S. (2003). A Review of Advances in Dielectric and Electrical Conductivity Measurement in Soils Using Time Domain Reflectometry. *Vadose Zone Journal*, Vol. 2, N° 4, p. 444-475.

- ROHDE & SCHWARZ (2006). Measurement of Dielectric Material Properties. Application note. RAC-0607-0019, ApplicationCenter Asia/Pacific.
- SABOUROUX, P. e BA, D. (2011). EpsiMu, a Tool for Dielectric Properties Measurement of Porous Media: Application in Wet Granular Materials Characterization. Progress in Electromagnetics Research B, Vol. 29, p. 191-207.
- SENSORS & SOFTWARE INCORPORATION (2013). Software & Software Inc. website. Subsurface Imaging Solution with GPR (<http://www.sensoft.ca/>).
- ULABY, F. T. (2004). Fundamentals of Applied Electromagnetics. 2004 media edition, USA, Cap. 4, p.156.
- VOLAKIS, J. L. (2007). Antenna Engineering Handbook, Fourth Edition, The Ohio State University, Ohio, USA, Cap. 51, p. 35.
- WHITES, K. W. (2012). Measurement Errors. TRL Calibration of a VNA. Course EE 481 (Microwave Engineering), Lecture 22. Department of Electrical and Computer Engineering, South Dakota School of Mines & Technology, South Dakota , USA.

7. APÊNDICE

Tabela A1. Dados de guias de onda retangular padrão (Pozar, 2003).

Banda*	Faixa de frequência recomendada (GHz)	Frequência de Cutoff TE ₁₀ (GHz)	Denominação EIA WR-XX	Dimensões internas Polegadas (cm)	Dimensões externas Polegadas (cm)
L	1.12-1.70	0.908	WR-650	6.500 x 3.250 (16.510 x 8.255)	6.660 x 3.410 (16.916 x 8.661)
R	1.70-2.60	1.372	WR-430	4.300 x 2.150 (10.922 x 5.461)	4.460 x 2.310 (11.328 x 5.867)
S	2.60-3.95	2.078	WR-284	2.840 x 1.340 (7.214 x 3.404)	3.000 x 1.500 (7.620 x 3.810)
H (G)	3.95-5.85	3.152	WR-187	1.872 x 0.872 (4.755 x 2.215)	2.000 x 1.000 (5.080 x 2.540)
C (J)	5.85-8.20	4.301	WR-137	1.372 x 0.622 (3.485 x 1.580)	1.500 x 0.750 (3.810 x 1.905)
W (H)	7.05-10.0	5.259	WR-112	1.122 x 0.497 (2.850 x 1.262)	1.250 x 0.625 (3.175 x 1.587)
X	8.20-12.4	6.557	WR-90	0.900 x 0.400 (2.286 x 1.016)	1.000 x 0.500 (2.540 x 1.270)
Ku (P)	12.4-18.0	9.486	WR-62	0.622 x 0.311 (1.580 x 0.790)	0.702 x 0.391 (1.783 x 0.993)
K	18.0-26.5	14.047	WR-42	0.420 x 0.170 (1.070 x 0.430)	0.500 x 0.250 (1.270 x 0.635)
Ka (R)	26.5-40.0	21.081	WR-28	0.280 x 0.140 (0.711 x 0.356)	0.360 x 0.220 (0.914 x 0.559)
Q	33.0-50.5	26.342	WR-22	0.224 x 0.112 (0.570 x 0.280)	0.304 x 0.192 (0.772 x 0.488)
U	40.0-60.0	31.357	WR-19	0.188 x 0.094 (0.480 x 0.240)	0.268 x 0.174 (0.681 x 0.442)
V	50.0-75.0	39.863	WR-15	0.148 x 0.074 (0.380 x 0.190)	0.228 x 0.154 (0.579 x 0.391)
E	60.0-90.0	48.350	WR-12	0.122 x 0.061 (0.310 x 0.015)	0.202 x 0.141 (0.513 x 0.356)
W	75.0-110.0	59.010	WR-10	0.100 x 0.050 (0.254 x 0.127)	0.180 x 0.130 (0.458 x 0.330)
F	90.0-140.0	73.840	WR-8	0.080 x 0.040 (0.203 x 0.102)	0.160 x 0.120 (0.406 x 0.305)
D	110.0-170.0	90.854	WR-6	0.065 x 0.0325 (0.170 x 0.083)	0.145 x 0.1125 (0.368 x 0.2858)
G	140.0-220.0	115.750	WR-5	0.051 x 0.0255 (0.130 x 0.0648)	0.131 x 0.1055 (0.333 x 0.2680)

* As letras em parênteses denotam denominações alternativas.