

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas

**OTIMIZAÇÃO DE PERFIS DE REFLEXÃO GPR SOBRE MANILHAS
DE CONCRETO E TUBULAÇÕES DE PVC INSTALADAS NO SÍTIO
CONTROLADO DE GEOFÍSICA RASA DO IAG/USP**

ROBSON SANTOS LIMA

São Paulo
2006

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

ROBSON S. LIMA

Otimização de perfis de reflexão gpr sobre manilhas de concreto e tubulações de pvc instaladas no Sítio controlado de geofísica rasa do IAG/USP

Dissertação apresentada ao Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências. Área de concentração: Geofísica.

Orientador: Prof. Dr. Jorge Luís Porsani

São Paulo
2006

AGRADECIMENTOS

À Deus por me proporcionar saúde e disposição, dia após dia, para que pudesse levar a pesquisa em bons termos;

Ao Programa de Pós-Graduação em Geofísica do IAG/USP, pela oportunidade, estrutura e convívio durante esse período de aprendizagem;

Ao Professor Dr. Jorge Luís Porsani, pela orientação, sugestões e críticas oferecidas no decorrer dessa experiência acadêmica;

Ao relator, Professor Dr. Vagner Roberto Elis, pelo acompanhamento dos relatórios de pós graduação;

À CAPES, pela bolsa de estudos, a qual foi de grande importância para o meu sustento;

Aos companheiros da geofísica, Ernande (técnico da geofísica), Cláudia, Marcus Vinícius, Welitom, Vinícius e outros que me ajudaram de maneira essencial nos vários trabalhos de campo e discussões, onde os frutos são agora apresentados nessa pesquisa;

Aos meus pais, Maria e Acebias e irmãs, Tati e Juli pelo apoio, compreensão e ajuda em todos os momentos da minha vida;

À minha...namorada, Nádia Helena Bueno...Lima, pelo amor incondicional, apoio e compreensão em todos os momentos, entendendo minhas ausências, meus anseios e angústias. A ti digo, tu és a minha fortaleza, meu porto seguro onde encontro, refúgio e paz.

Aos novos amigos que aqui formei e que levarei muitas recordações, Alexandre Lopes, Gelvam, Dionísio (Tonho), Oleg, Marcelo Rocha, Ivan, Welitom (Boca aberta), Cláudia, Selma, Danilo, Eduardo, Ahmed, Emilson, Francisca, Deborah, Alana, Daniele, Lucieth, Manuele, Andrea foi um prazer conhecê-los e muito obrigado pelo convívio;

Aos momentos de descontração vividos nos bandejões e às refeições saborosas neles servidos;

Às secretárias da pós-graduação e do Depto. de Geofísica pelos apoios recebidos;

Enfim, à todos aqueles que direta ou indiretamente nos apoiaram e que contribuíram para que eu cumprisse essa importante etapa.

RESUMO

LIMA, R. S., 2006. **Otimização de Perfis de Reflexão GPR sobre manilhas de concreto e tubulações de PVC instalados no Sítio Controlado de Geofísica Rasa do IAG-USP. Dissertação de Mestrado, IAG-USP, São Paulo. 130p.**

Nesta pesquisa são apresentados resultados de perfis de reflexão GPR realizados sobre duas linhas instaladas no campo de provas do IAG-USP ou Sítio Controlado de Geofísica Rasa do IAG-USP, visando à obtenção de parâmetros ótimos de campo para melhorar a caracterização de interferências normalmente encontradas no ambiente de grandes centros urbanos. Uma linha de estudos é caracterizada por manilhas de concreto vazias de diferentes diâmetros e a outra é caracterizada por tubulações de PVC com 4" de diâmetro (vazias, cheias e semi preenchidas por água de torneira), ambas instaladas em várias profundidades. Vários parâmetros de campo foram testados, tais como, modos de aquisição dos dados passo a passo e contínuo, frequências de 100 MHz e 200 MHz, arranjos de antenas Ey-Ey e Ex-Ex, *stacks* iguais a 4, 8, 16, 32, 64, 128, 256 e 512 e espaçamentos entre traços de 0,2 m, 0,1 m e 0,05 m. Após os testes destes parâmetros foram estabelecidos fluxogramas de processamentos para o conjunto de dados com iguais frequências e arranjos de antenas, evitando assim, que o processamento influenciasse as características dos parâmetros usados no campo. Estudos de modelagens numéricas bidimensionais para as duas linhas foram realizados, através do método das diferenças finitas no domínio do tempo-FDTD, onde foram obtidos padrões de refletores típicos para cada tipo de alvo e estes permitiram dar maior confiabilidade na interpretação dos dados. A análise dos perfis de reflexão permitiu definir os melhores parâmetros de campo para a identificação das interferências instaladas nas duas linhas de estudos. Na linha de manilhas de concreto os parâmetros que proporcionaram imagens com melhor qualidade foram: aquisição dos dados no modo passo a passo, frequência de 100 MHz, arranjo de antenas Ex-Ex, espaçamento entre traços de 0,2 m e *stack* de 512, onde este último proporcionou melhor identificação das manilhas menores, localizadas a maiores profundidades. Por outro lado, na linha de tubulações de pvc os parâmetros de aquisição que possibilitaram a detecção de mais alvos e com melhor resolução foram: aquisição dos dados no modo contínuo, frequência de 200 MHz, arranjo de antenas Ey-Ey, espaçamento entre traços de 0,05 m e *stack* de 32. Nesta linha, somente os alvos mais rasos instalados até 1m de profundidade apresentaram uma boa correlação com os resultados da modelagem, devido à elevada atenuação da onda eletromagnética no meio. Para os resultados apresentados nas duas linhas de estudos, fica claro que o bom imageamento dos alvos depende de uma combinação de fatores, como, frequência e arranjo das antenas, disposição, geometria, profundidade e composição dos alvos, espaçamento entre os traços e *stack*. Os resultados desta pesquisa apresentaram uma boa concordância com os resultados das modelagens numéricas e estão de acordo com os resultados publicados na literatura, podendo ser utilizados como referência para futuros trabalhos onde não se têm informações da subsuperfície.

Palavras-chave: GPR, Ground Penetrating Radar, modelagem numérica bidimensional, Sítio Controlado de Geofísica Rasa do IAG-USP, SCGR, manilhas de concreto, tubulações de pvc, polarização de antenas.

ABSTRACT

LIMA, R. S., 2006. **GPR reflection profile optimization on concrete tubes and PVC pipes buried on the Controlled Test Site of Shallow Geophysics of IAG-USP. 130p.**

In this research are presented results of GPR reflection profiles of two lines constructed on the test site of IAG-USP or Controlled Test Site of Shallow Geophysics of IAG-USP, aiming at the optimization of the field parameters for the advanced characterization of interferences found in big urban cities environment. One line is characterized by empty concrete tubes of different diameters and the other is characterized by PVC pipe of 4" diameter (the pipes are empty, completely filled and partially filled with water), both installed in various depths. Many field parameters were tested, such as, step by step mode and continuous mode acquisition, 100 MHz and 200 MHz frequencies, antennas configuration of Ey -Ey and Ex-Ex, stacks of 4, 8, 16, 32, 64, 128, 256 and 512 and trace of 0,2 m, 0,1 m and 0,05 m. After testing these parameters, processing steps were established for the data set with the same frequency and antenna configuration, avoiding the influence of the processing on the field parameters. Two dimensional numerical modeling studies were made for the two lines, using the Finite Difference Time Domain method – FDTD, where patterns of typical reflectors were obtained for each type of target and these patterns allowed de data interpretation confidence to be enhanced. The reflection profile analysis implied the definition of the best field parameters used to identify the interferences installed on both studies lines. On the concrete tubes the parameters provided best quality images were: step by step data acquisition, 100 MHz frequency, Ex-Ex antenna configuration, 0,2m trace spacing e 512 stack, while the last provided best recognition of the smaller tubes, localized at higher depths. On the PVC piping, on the other side, the acquisitions parameters that improved the detection of more targets a best resolutions were: continuous data acquisition, 200 MHz frequency, Ey-Ey antenna configuration, 0,05 trace spacing and 32 stack. On this line, only the shallower targets, buried up to the depth of 1 m presented good correlation with the modeling, due to the high attenuation of the electromagnetic field by the medium. For the presented results on both lines, it is clear that the good imaging of targets depends on parameters matching, like frequency and antenna configuration, arrangement, geometric arrangement, target composition and depth, trace spacing and stack. The results of this research showed good agreement with the numerical modeling results and with the literature, can be used like reference to future survey where none informations of subsurface is available.

Key-words: GPR, Ground Penetrating Radar, 2D numerical modeling, Controlled Test Site of Shallow Geophysics of IAG USP, SCGR, concrete tubes, pvc pipes, antennas polarization.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Mapa de localização do SCGR no campus da USP em São Paulo.....	17
Figura 2.2 – Área onde o SCGR do IAG está instalado.....	18
Figura 2.3 - Disposição dos alvos no SCGR IAG/USP.....	20
Figura 2.4 – Tubo de pvc implantado na linha de tubulação hidráulica.....	21
Figura 2.5– Disposição dos tubos de PVC instalados no SCGR do IAG/USP e o cano metálico guia.....	22
Figura 2.6 – Instalação da manilha de concreto “N” no SCGR do IAG/USP.....	23
Figura 2.7 – Disposição das manilhas de concreto no SCGR do IAG/USP.....	23
Figura 3.1 – Arranjos de antenas (adaptado de Annan, 1992).....	42
Figura 3.2 – Arranjos de antenas (adaptado de Radzevicius, 2001 e outros).....	42
Figura 3.3 – Arranjo de antenas utilizado nas aquisições de campo.....	43
Figura 3.4 - Padrões de radiação TE (Ey-Ey) e TM (Ex-Ex) (adaptada de Annan, 1992).....	44
Figura 4.1 – Gráfico para definição genérica de derivada central de um ponto para uma função $f(x)$ em um ponto P qualquer.....	46
Figura 4.2 – Malha geométrica implementada no software Reflexw, conhecida como célula bidimensional de Yee.....	47
Figura 4.3 - Modelo GPR 2D dos alvos instalados na linha de tubos de PVC.....	52
Figura 4.4 - Modelagem da linha de tubos de pvc utilizando arranjo de antenas Ey-Ey, espaçamento entre traços de 0,2m e frequência de 100MHz.....	53
Figura 4.5 - Modelagem com arranjo antenas Ey-Ey, espaçamento entre traços de 0,1m e frequência de 100 MHz.....	54
Figura 4.6 - Modelagem com arranjo de antenas Ey-Ey, espaçamento entre traços de 0,01m e frequência de 100 MHz.....	55
Figura 4.7 - Modelagem com arranjo de antenas Ex-Ex, espaçamento entre traços de 0,01m e frequência de 100 MHz.....	56
Figura 4.8 - Modelagem com arranjo de antenas Ey-Ey, espaçamento entre traços de 0,01m e frequência de 200 MHz.....	57
Figura 4.9 - Modelagem com arranjo de antenas no modo Ex-Ex, espaçamento entre traços de 0,01m e frequência de 200 MHz.....	58
Figura 4.10 – Modelo de entrada dos alvos para a simulação numérica da linha de manilhas de concreto.....	60

Figura 4.11 - Modelagem com arranjo de antenas Ey-Ey, espaçamento entre traços de 0,01m e frequência de 100 MHz.....	60
Figura 4.12 - Modelagem com arranjo de antenas Ex-Ex, espaçamento entre traços de 0,01m e frequência de 100 MHz.....	61
Figura 4.13 - Modelagem com arranjo de antenas Ey-Ey, espaçamento entre traços de 0,01m e frequência de 200 MHz.....	62
Figura 4.14 - Modelagem com arranjo de antenas Ex-Ex, espaçamento entre traços de 0,01m e frequência de 200 MHz.....	62
Figura 5.1 – Aquisições de campo passo a passo. a) arranjo Ey-Ey com antena de 100MHz, b) arranjo Ex-Ex com antena de 100MHz e c) arranjo Ey-Ey com antena de 200 MHz.....	65
Figura 5.2 – Aquisições de campo no modo contínuo, a) arranjo Ey-Ey com antena de 100MHz, b) arranjo Ey-Ey com antena de 200MHz.....	66
Figura 5.3 – Aquisições realizadas no modo passo a passo, arranjo Ey-Ey, frequência de 100MHz e espaçamento entre traços de 0,2m. a) stack 4, b) stack 8, c) stack 16 e d) stack 32.....	69
Figura 5.4 – Aquisições realizadas no modo passo a passo, arranjo Ey-Ey, frequência de 100MHz e espaçamento entre traços de 0,2m. a) stack 64, b) stack 128, c) stack 256 e d) stack 512.....	70
Figura 5.5 – Aquisições realizadas no modo contínuo, arranjo Ey-Ey, frequência de 100MHz e espaçamento entre traços igual a 0,2m. a) stack 4, b) stack 8, c) stack 16 e d) stack 32.....	73
Figura 5.6 – Aquisições realizadas no modo contínuo, arranjo Ey-Ey, frequência de 100MHz e espaçamento entre traços igual a 0,1m. a) Stack 4, b) Stack 8, c) Stack 16 e d) Stack 32.....	74
Figura 5.7 - Aquisições realizadas no modo contínuo, arranjo Ey-Ey, frequência de 100MHz e espaçamento entre traços igual a 0,05m. a) Stack 4, b) Stack 8, c) Stack 16 e d) Stack 32.....	75
Figura 5.8 – Aquisições realizadas no modo passo a passo, arranjo Ey-Ey, frequência de 200MHz e espaçamento entre traços de 0,2m. a) stack 4, b) stack 8, c) stack 16 e d)stack 32.....	78
Figura 5.9 – Aquisições realizadas no modo passo a passo, arranjo Ey-Ey, frequência de 200MHz e espaçamento entre traços de 0,2m. a) stack 64, b) stack 128, c) stack 256 e d) stack 512.....	79

Figura 5.10 – Aquisições realizadas no modo contínuo, arranjo Ey-Ey, frequência de 200MHz

Figura 5.23 - Espectro de amplitude de um traço GPR referente ao topo do refletor da manilha Q de frequência 100MHz para o arranjo Ex-Ex.....	98
Figura 5.24 - Espectro de amplitude de um traço GPR referente ao topo do refletor da manilha Z de frequência 100MHz para o arranjo Ey-Ey.....	99
Figura 5.25 - Espectro de amplitude de um traço GPR referente ao topo do refletor da manilha Z de frequência 100MHz para o arranjo Ex-Ex.....	99
Figura 5.26 – Aquisições realizadas no modo passo a passo, arranjo Ey-Ey, frequência de 100MHz e espaçamento entre traços de 0,2m. a) stack 4, b) stack 8, c) stack 16 e d) stack 32.....	102
Figura 5.27 – Aquisições realizadas no modo passo a passo, arranjo Ey-Ey, frequência de 100MHz e espaçamento entre traços de 0,2m. a) stack 64, b) stack 128, c) stack 256 e d) stack 512.....	103
Figura 5.28 – Aquisições realizadas no modo contínuo, arranjo Ey-Ey, frequência de 100MHz e espaçamento entre traços igual a 0,2m. a) stack 4, b) stack 8, c) stack 16 e d) stack 32.....	105
Figura 5.29 – Aquisições realizadas no modo contínuo, arranjo Ey-Ey, frequência de 100MHz e espaçamento entre traços igual a 0,1m. a) Stack 4, b) Stack 8, c) Stack 16 e d) Stack 32.....	107
Figura 5.30 - Aquisições realizadas no modo contínuo, arranjo Ey-Ey, frequência de 100MHz e espaçamento entre traços igual a 0,05m. a) Stack 4, b) Stack 8, c) Stack 16 e d) Stack 32.....	108
Figura 5.31 – Aquisições realizadas no modo passo a passo, arranjo Ey-Ey, frequência de 200MHz e espaçamento entre traços de 0,2m. a) stack 4, b) stack 8, c) stack 16 e d) stack 32.....	110
Figura 5.32 – Aquisições realizadas no modo passo a passo, arranjo Ey-Ey, frequência de 200MHz e espaçamento entre traços de 0,2m. a) stack 64, b) stack 128, c) stack 256 e d) stack 512.....	111
Figura 5.33 – Aquisições realizadas no modo contínuo, arranjo Ey-Ey, frequência de 200MHz e espaçamento entre traços igual a 0,2m. a) stack 4, b) stack 8, c) stack 16 e d) stack.....	113
Figura 5.34 – Aquisições realizadas no modo contínuo, arranjo Ey-Ey, frequência de 200MHz e espaçamento entre traços igual a 0,1m. a) stack 4, b) stack 8, c) stack 16 e d) stack 32.....	114

Figura 5.35 – Aquisições realizadas no modo contínuo, arranjo Ey-Ey, frequência de 200MHz e espaçamento entre traços igual a 0,05m. a) stack 4, b) stack 8, c) stack 16 e d) stack 32.....	115
Figura 5.36 - Aquisições realizadas no modo passo a passo, arranjo Ex-Ex, frequência de 100MHz e espaçamento entre traços igual a 0,2m. a) stack 4, b) stack 8, c) stack 16 e d) stack 32.....	117
Figura 5.37 - Aquisições realizadas no modo passo a passo, arranjo Ex-Ex, frequência de 100MHz e espaçamento entre traços igual a 0,2m. a) stack 64, b) stack 128, c) stack 256 e d) stack 512.....	118
Figura 5.38 - Aquisições realizadas no modo passo a passo, arranjo Ex-Ex, frequência de 200MHz e espaçamento entre traços igual a 0,2m. a) stack 4, b) stack 8, c) stack 16 e d) stack 32.....	119
Figura 5.39 - Aquisições realizadas no modo passo a passo, arranjo Ex-Ex, frequência de 200MHz e espaçamento entre traços igual a 0,2m. a) stack 64, b) stack 128, c) stack 256 e d) stack 512.....	120

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Posicionamento e profundidades reais dos alvos da linha de tubos de pvc.....	24
Tabela 2.2 – Posicionamento e profundidades reais dos alvos da linha de manilhas de concreto.....	25
Tabela 3.1 –Valores de permissividade dielétrica (ϵ)	



SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	13
INTRODUÇÃO E OBJETIVOS.....	13
CAPÍTULO 2	16
ÁREA DE ESTUDOS – O SCGR.....	16
2.1. A proposta do Sítio Controlado de Geofísica Rasa – SCGR.....	16
2.2. Caracterização geológica local.....	18
2.3. Descrição dos alvos estudados.....	19
CAPÍTULO 3	26
O MÉTODO GPR – Ground Penetrating Radar.....	26
3.1. Introdução.....	26
3.2. Histórico.....	27
3.3. Princípios Físicos.....	28
3.4. Polarização.....	40
CAPÍTULO 4	45
MODELAGENS NUMÉRICAS GPR 2D.....	45
4.1. O método FDTD e características do software Reflexw.....	45
4.2. Resultados das modelagens.....	51
4.2.1. Linha de tubos de pvc.....	51
4.2.2. Linha de manilhas de concreto.....	59
CAPÍTULO 5	64
AQUISIÇÃO, PROCESSAMENTO E INTERPRETAÇÃO DOS DADOS.....	64
5.1. Aquisição dos dados.....	64
5.2. Processamento dos dados.....	66
5.3. Interpretação dos resultados.....	68
5.3.1. Linha de manilhas de concreto.....	68
5.3.2. Linha de tubulação de pvc.....	101
CAPÍTULO 6	122
CONCLUSÕES.....	122
REFERÊNCIAS.....	127

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

No mundo globalizado, o crescimento de uma sociedade é ditado, dia após dia, através do crescimento de seus pólos industriais e comerciais. No entanto, este fato faz com que grandes quantidades de pessoas passem a migrar e se fixar nessas áreas, atraídas pelo desenvolvimento e conseqüentemente melhores condições de vida.

Quando tal ocupação territorial (populacional, industrial e comercial) acontece em cidades, as quais, não se planejaram a suportar tal demanda, ocorre naturalmente a necessidade de aumentar o espaço físico. Então, soluções urgentes tornam-se necessárias e, sendo assim são, portanto, iniciadas obras subterrâneas, tais como, o avanço de túneis do metrô, construções de garagens subterrâneas, passagens de cabos elétricos e telefônicos, tubulações de gás, galerias de canalização de águas pluviais, redes de esgotos, etc.

Devido a essas obras transtornos podem ser gerados, por exemplo, o rompimento de tubulações de gás, água, esgotos, cabos de telefonia, dentre outros, provocando prejuízos irreparáveis ao estado e à população, uma vez que essas construções são realizadas em áreas já urbanizadas, ou seja, com residências, comércios, indústrias e escolas.

É nesse contexto que os métodos de investigações geofísicas, mostram seu potencial e conseqüentemente sua importância. Como é do conhecimento dos geocientistas, as

investigações geofísicas podem auxiliar na melhoria do planejamento urbano e na remediação de problemas, pois são adequadas para a localização de interferências no subsolo, dentre outras aplicações. As principais vantagens dos métodos de investigações geofísicas são o baixo custo de operação e a rapidez nos levantamentos de campo (REYNOLDS, 1997). Entretanto, o grande desafio para os geofísicos deste século, consiste na aplicação de métodos não destrutivos em áreas urbanas, devido às edificações e aos altos níveis de ruídos presentes nesses meios, tais como, as interferências das ondas eletromagnéticas (i.e. telefonia celular, rádios, etc.), que dificultam sensivelmente a interpretação dos resultados.

Para diminuir as ambigüidades presentes na interpretação de dados geofísicos em ambiente urbano, foi instalado dentro do campus da Universidade de São Paulo – USP o “Sítio Controlado de Geofísica Rasa” – SCGR do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas – IAG. Dentro dessa área de testes controlados de geofísica rasa vários alvos foram instalados ao longo de sete linhas, visando simular problemas geotécnicos, ambientais e arqueológicos. Informações detalhadas sobre os moldes construtivos do SCGR, bem como, as informações dos diferentes materiais instalados são encontradas em PORSANI et al., 2006.

Esta pesquisa tem como objetivo fazer uma avaliação das técnicas de aquisição de perfis de reflexão, utilizando o método GPR - Ground Penetrating Radar na área de testes controlados, denominada, SCGR do IAG, sobre duas linhas de estudos, uma contendo tubos de PVC, vazios, parcialmente e totalmente preenchidos por água de torneira e outra contendo manilhas de concreto, totalmente vazias, e com diferentes diâmetros. Para tal, foram empregados os modos de aquisição (contínuo e passo a passo), arranjos de antenas, Ey-Ey (TE) e Ex-Ex (TM), e diversos parâmetros, tais como, frequência de antenas (100 MHz e 200 MHz), espaçamento entre traços e *stack* (empilhamento de traços) variando de 4 a 512. Portanto, esta pesquisa visa determinar qual a combinação dos elementos acima citados que

otimizam a imagem para a identificação dos alvos localizados nas linhas de manilhas de concreto e tubos de pvc.

Aliados aos dados de campo e para dar maior confiabilidade na interpretação dos resultados, também foram realizados estudos de modelagens numéricas bidimensionais sobre as duas linhas, simulando diferentes arranjos de antenas, frequências e espaçamento entre traços, utilizando o software Reflexw, que simula a propagação de ondas EM por meio do método das diferenças finitas no domínio do tempo (SANDMEIER, 2004).

A interpretação é feita com base em uma análise integrada do conjunto de dados adquiridos em campo, as modelagens numéricas e as profundidades reais dos objetos investigados. Os resultados poderão ser úteis para o planejamento e remediações de lugares onde não existam conhecimentos prévios de alvos em subsuperfície.

Esta dissertação está estruturada sob a forma de seis capítulos, apresenta da seguinte maneira, o primeiro capítulo contém as informações gerais a respeito da pesquisa, ou seja, uma breve introdução, objetivos e organização da pesquisa. No segundo capítulo está descrita brevemente a proposta do SCGR, bem como, sua caracterização geológica, as linhas estudadas e os alvos enterrados.

No terceiro capítulo é apresentada uma introdução, um breve histórico e fundamentos teóricos do método GPR. No quarto capítulo são discutidas e apresentadas as modelagens numéricas, as quais simulam os diferentes arranjos de antenas e frequências, assim como, o espaçamento entre as aquisições, ou seja, o espaçamento entre os traços.

A aquisição dos dados, assim como, os parâmetros de aquisição, etapas do processamento e interpretação final dos perfis GPR estão apresentados no quinto capítulo.

O fechamento da pesquisa, ou seja, as conclusões e recomendações estão descritas no sexto capítulo.

CAPÍTULO 2

ÁREA DE ESTUDOS – O SCGR

2.1. A proposta do Sítio Controlado de Geofísica Rasa - SCGR

Comumente, os levantamentos geofísicos são realizados em áreas onde pouca ou quase nenhuma informação sobre a subsuperfície é conhecida. Devido, a essa falta de informações aliada às inúmeras fontes de interferências, os resultados obtidos, principalmente, das aquisições em ambientes urbanos são em sua grande maioria ambíguos.

Visando minimizar essa ambigüidade durante a interpretação dos dados, através da obtenção de respostas padrões para determinados objetos em subsuperfície é que foi concebida a idéia da realização de estudos sobre diversos tipos de alvos em uma área de testes controlados, ou seja, em uma área onde há o conhecimento da geologia, do posicionamento, forma e composição dos alvos.

A idéia de estudar áreas contaminadas e objetos com importâncias, geotécnicas, geológicas, arqueológicas, dentre outras, em um ambiente controlado não é recente. Vários pesquisadores pelo mundo já realizaram e vêm realizando estudos em áreas com tais características, dentre estes, (BOWDERS JR. et al., 1982; DANIELS et al.,1994; GRANDJEAN et al.,

No Brasil, os estudos pioneiros dessa natureza são atribuídos ao Prof. Jorge L. Porsani (PORSANI, 2002), o qual implantou o Sítio Controlado de Geofísica Rasa – SCGR em um terreno localizado em frente ao IAG – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, dentro do campus da Universidade de São Paulo, localizado em São Paulo. As Figuras, 2.1 e 2.2 mostram a localização do SCGR no campus da USP e o tipo de terreno em que foi construído, respectivamente.

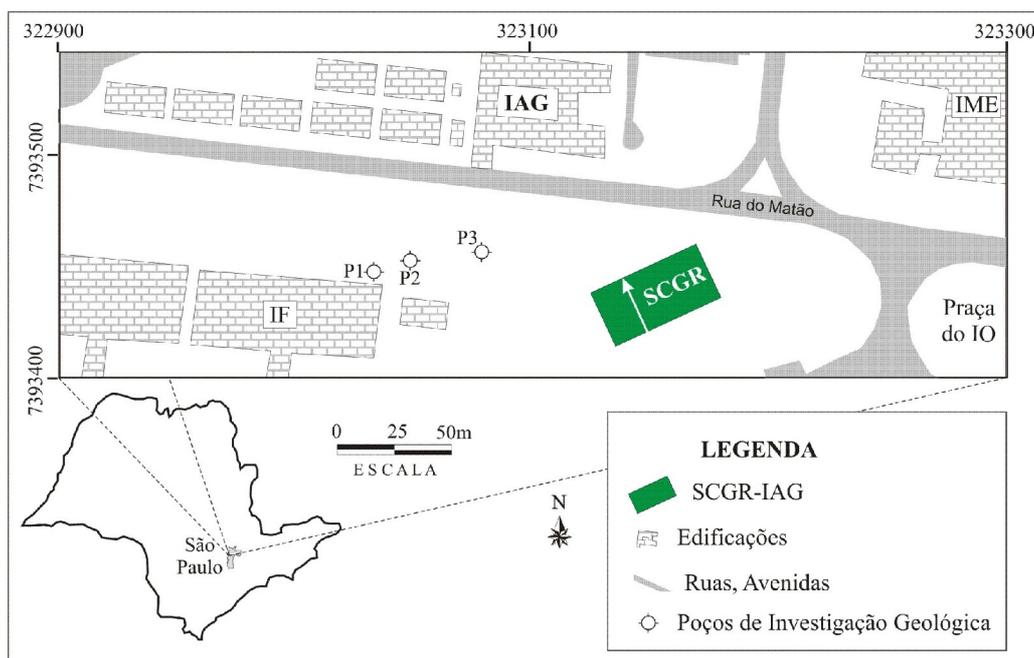


Figura 2.1 – Mapa de localização do SCGR no campus da USP em São Paulo



Figura 2.2 – Área onde o SCGR do IAG está instalado

2.2. Caracterização geológica local

Segundo Marcelino (1999) o Campus está assentado sobre duas formações, a primeira denominada, formação São Paulo e a segunda, Itaquaquetuba, ambas, evidenciadas pelos afloramentos localizados, respectivamente, ao sul e ao norte da cidade universitária. Dessa maneira, devido ao fato do SCGR situar-se na zona sul do campus, este está contido sobre a borda da bacia sedimentar de São Paulo, a qual compreende uma porção do *Rift* continental do Sudeste do Brasil, formada na era Cenozóica (IRITANI, 1993).

A geologia da área de testes controlados foi efetivamente estudada, através do projeto denominado “Investigações Geofísicas de Superfície e de Poço na borda da Bacia Sedimentar de São Paulo”, processo nº. 99/12215-2 financiado pela FAPESP. Nesse projeto foram executadas as perfurações de três poços de investigações geológicas e as informações obtidas serviram para estabelecer perfis litológicos, onde (BORGES, 2002), através das informações desses poços, juntamente com furos de sondagens e metodologias geofísicas conseguiu estipular na porção sul do campus, a profundidade da base do aterro e também o topo da camada de areia grossa por meio do GPR. Além disso, foram delimitados os horizontes

resistivos e condutivos da Bacia de São Paulo, sendo que a partir da profundidade de 43m foi obtido o valor de resistividade de aproximadamente 2500 ohm.m, o qual indica que se trata do topo do embasamento granito-gnáissico.

Após a integração de vários dados, tais como, GPR, sísmica (reflexão e refração), eletrorresistividade e perfilagens de poços, ficou evidenciado pelas perfilagens que a espessura do pacote de sedimentos contidos na área de instalação do sítio controlado não excedem os 53 m de profundidade (PORSANI et al, 2004).

Dessa maneira, foi determinado que a área é composta por um aterro caracterizado por argila arenosa a siltosa com espessura inferior a 3m. Uma cobertura neocenozóica é observada até 6m de profundidade, sendo evidenciada por argilas enriquecidas em matéria orgânica. A partir daí, predominam 47 m de sedimentos areno-argilosos (formações Resende e São Paulo), sobrepostos ao embasamento granito-gnáissico (PORSANI et al., op cit).

2.3. Descrição dos alvos estudados

Os diversos objetos implantados nas sete linhas de estudos do SCGR – IAG/USP foram escolhidos visando simular alvos comumente encontrados no ambiente urbano, tais como, alvos geotécnicos, arqueológicos, situações de contaminação ambiental, etc. Assim, nessa área foram inseridas as seguintes linhas de estudos: arqueológica; tubulações de pvc; manilhas de concreto; tambores metálicos; tambores plásticos; tubos metálicos; cabos elétricos, hidráulicos e conduítes, i.e., tubulações para passagem de cabos de fibra ótica. Informações detalhadas sobre a instalação do SCGR do IAG, bem como dos alvos enterrados em cada uma das sete linhas de estudos são encontrados em Porsani et al. (2006).

Na posição de 15m (NS) foi enterrado um cano metálico guia de 1,5” (polegadas) de diâmetro. Este alvo servirá de referência para os levantamentos geofísicos que vierem a ser realizados.

Nesta pesquisa, os estudos são concentrados sobre duas das sete linhas existentes no SCGR. A primeira corresponde a linha composta por manilhas de concreto e a segunda corresponde à linha composta por tubulações de pvc. Esses alvos representam os tipos de objetos encontrados na maioria das grandes cidades.

A Figura 2.3, mostra a disposição dessas linhas na área do SCGR – IAG/USP.

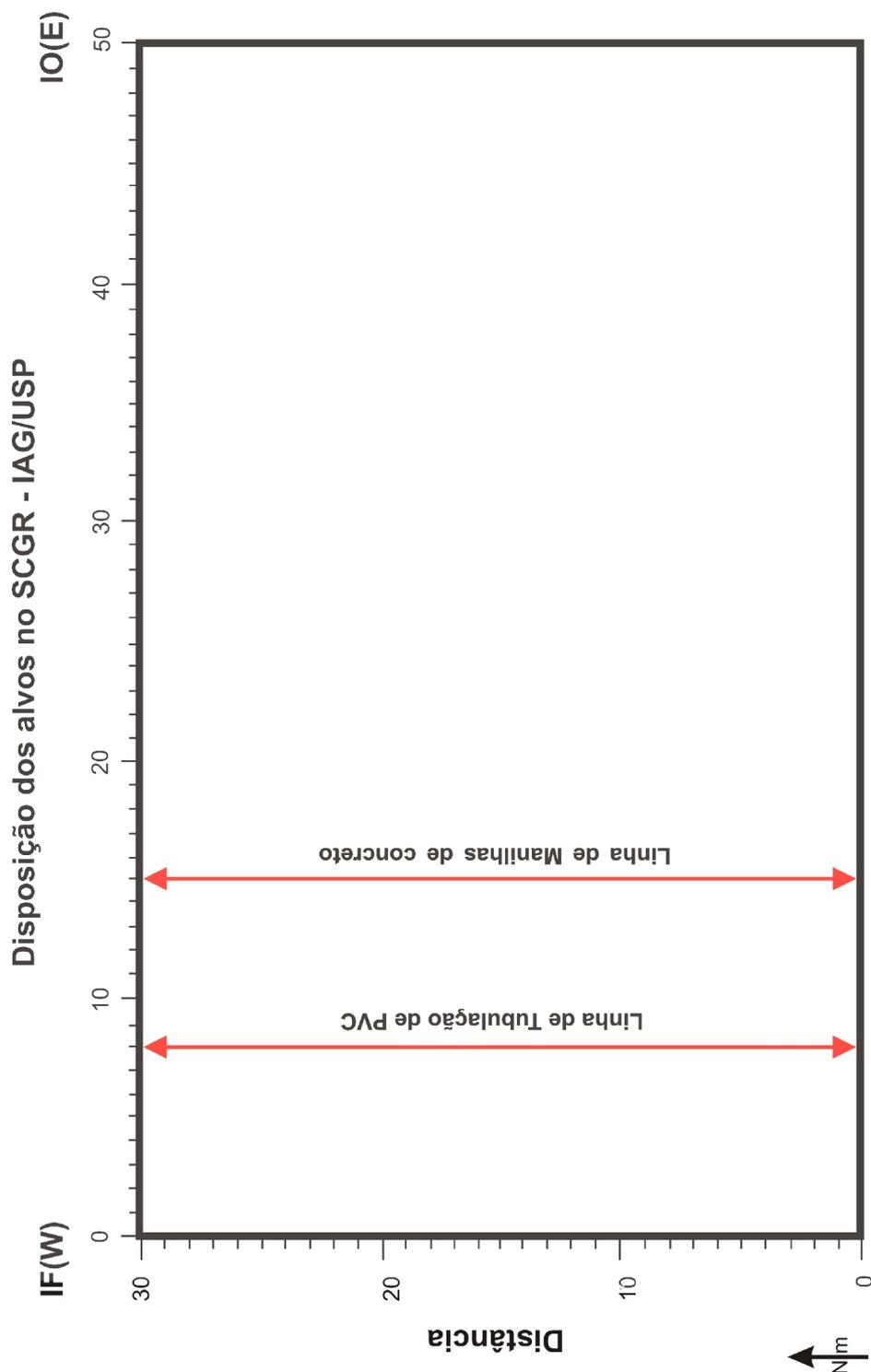


Figura 2.3 - Disposição dos alvos no SCGR - IAG/USP

A linha de tubulações de PVC possui um comprimento (S-N) de 30m e está localizada no SCGR na posição (W-E) de 8m. É composta por 12 tubos de PVC, dispostos na direção horizontal (W-E), distribuídos em profundidades que variam de 0,5m a 2,0m. A Figura 2.4 mostra a disposição de um desses tubos de PVC. Todos os objetos possuem diâmetros externos de 13,6 cm, espessura de 8mm e 2m de comprimento, sendo que são divididos em três grupos, de acordo com o conteúdo interno. O primeiro grupo contém os quatro primeiros alvos cheios de água de torneira, os quatro subseqüentes são parcialmente preenchidos com água de torneira e os quatro restantes são vazios. A Figura 2.5 mostra a disposição dos alvos enterrados na linha de tubos de pvc.



Figura 2.4 – Tubo de pvc implantado na linha de tubulação hidráulica

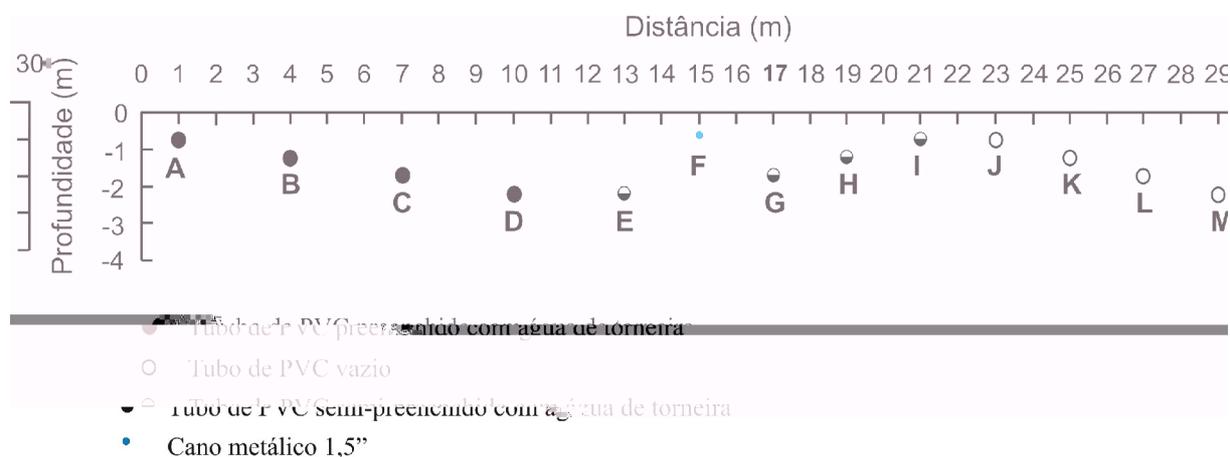


Figura 2.5 – Disposição dos tubos de PVC instalados no SCGR do IAG/USP e o cano metálico guia.

A linha de manilhas de concreto possui um comprimento (S-N) de 30m e está localizada na posição (W-E) de 15m, sendo composta por 11 manilhas de concreto vazias, distribuídas em profundidades que variam de 0,5m a 2,0m, sendo que, dez destas estão dispostas na direção horizontal (W-E) e uma (alvo P) está disposta na direção vertical. Os alvos apresentam três diferentes diâmetros externos e espessuras, onde as primeiras manilhas, N, O e P possuem diâmetro externo de 70 cm e espessura de 5 cm, sendo que possuem uma tela de ferro para sustentar sua estrutura, as manilhas Q, R, S e T, possuem diâmetros externos de 48 cm e espessura de 4 cm e as manilhas menores, U, V, X e Z, possuem diâmetros externos de 26 cm e espessura de 3 cm. A Figura 2.6 mostra a instalação da manilha “N” no SCGR e a Figura 2.7 mostra a disposição das manilhas de concreto no SCGR do IAG/USP.



Figura 2.6 – Instalação da manilha de concreto “N” no SCGR do IAG/USP

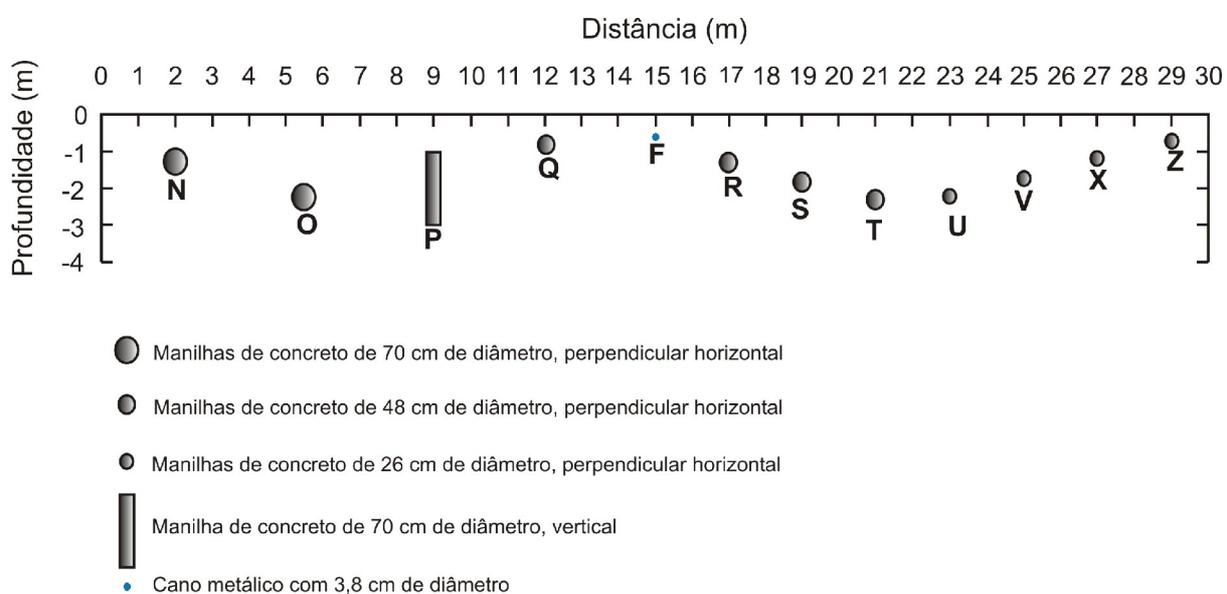


Figura 2.7 – Disposição das manilhas de concreto no SCGR do IAG/USP

A seguir, são apresentadas as Tabelas 2.1 e 2.2 com as posições e profundidades reais dos alvos das linhas de tubos de pvc e linha de manilhas de concreto, respectivamente.

Tabela 2.1 – Posicionamento e profundidades reais dos alvos da linha de tubos de pvc

Tubos	Posicionamento (m)	Prof. do topo (m)
A – Tubo de pvc cheio de água de torneira	1	0,5
B - Tubo de pvc cheio de água de torneira	4	1
C - Tubo de pvc cheio de água de torneira	7	1,5
D - Tubo de pvc cheio de água de torneira	10	2
E - Tubo de pvc semi preenchido com água de torneira	13	2
F – Cano guia de ferro	15	0,5
G - Tubo de pvc semi preenchido com água de torneira	17	1,5
H - Tubo de pvc semi preenchido com água de torneira	19	1
I - Tubo de pvc semi preenchido com água de torneira	21	0,5
J – Tubo de pvc vazio	23	0,5
K – Tubo de pvc vazio	25	1
L – Tubo de pvc vazio	27	1,5
M – Tubo de pvc vazio	29	2

Tabela 2.2 – Posicionamento e profundidades reais dos alvos da linha de manilhas de concreto

Manilhas	Posicionamento(m)	Prof. do topo (m)
N – Manilha de concreto vazia com 70 cm de diâmetro externo (horizontal). Contém malha de ferro em sua estrutura	2	0,85
O – Manilha de concreto vazia com 70 cm de diâmetro externo (horizontal). Contém malha de ferro em sua estrutura	5,5	1,7
P – Manilha de concreto vazia com 70 cm de diâmetro externo (vertical). Contém malha de ferro em sua estrutura	9	1
Q – Manilha de concreto vazia com 48 cm de diâmetro externo (horizontal)	12	0,5
F – Manilha de concreto vazia com 48 cm de diâmetro externo (horizontal)	15	0,5
R – Manilha de concreto vazia com 48 cm de diâmetro externo (horizontal)	17	1
S – Manilha de concreto vazia com 48 cm de diâmetro externo (horizontal)	19	1,5
T – Manilha de concreto vazia com 26 cm de diâmetro externo (horizontal)	21	2
U – Manilha de concreto vazia com 26 cm de diâmetro externo (horizontal)	23	2
V – Manilha de concreto vazia com 26 cm de diâmetro externo (horizontal)	25	1,5
X – Manilha de concreto vazia com 26 cm de diâmetro externo (horizontal)	27	1
Z – Manilha de concreto vazia com 26 cm de diâmetro externo (horizontal)	29	0,5

CAPÍTULO 3

O MÉTODO GPR – Ground Penetrating Radar

3.1. Introdução

Em geofísica, os métodos de investigação eletromagnéticos podem ser divididos em dois grandes grupos. O primeiro que compreende todos os métodos que trabalham com baixas frequências, ou seja, $< 1000\text{Hz}$, sendo aplicados a estudos em escalas profundas, e o segundo que abrange os métodos em altas frequências ($10\text{ MHz} - 2,5\text{ GHz}$), destinados a estudos rasos, onde se enquadra o método GPR.

O método GPR - Ground Penetrating Radar ou radar de penetração no solo é um método de investigação geofísica, não destrutivo, que visa imagear com alta resolução a subsuperfície rasa da terra (estruturas geológicas ou objetos implantados pelo homem), utilizando para isso, ondas eletromagnéticas na faixa da radiofrequência. Esses campos eletromagnéticos são gerados por uma antena dipolar, denominada, antena transmissora, a qual é colocada sobre a superfície da Terra e que ao ser excitada por uma diferença de potencial elétrico passa a emitir ondas eletromagnéticas para o meio.

A visualização dos dados, ou seja, a imagem do subsolo é gerada, através da

informação da energia refletida pelas estruturas em subsuperfície, que é captada por uma antena, denominada antena receptora, também disposta na superfície. Os dados são armazenados no disco rígido e mostrados simultaneamente na tela de um computador portátil (notebook).

3.2. Histórico

A idealização e posterior aplicação dos métodos eletromagnéticos, dentre eles o GPR, se remete à formulação da base teórica do eletromagnetismo clássico, por Maxwell em 1864.

Contudo, a idealização do emprego de sinais eletromagnéticos visando à identificação de objetos, foi atribuída a Hulsmeyer em 1904 (HULSMEYER, 1904 apud Daniels, 1996), o qual propôs o uso de sinais eletromagnéticos na identificação de objetos metálicos.

Entretanto, a primeira descrição da utilização de ondas eletromagnéticas para a localização de objetos enterrados foi feita através de uma patente alemã por LEIMBACH e LOWY, 1910 apud DANIELS, 1996, os quais fizeram uso de uma técnica alternativa, onde as antenas foram montadas separadamente sobre a superfície, visando identificar a reflexão de uma interface na subsuperfície, gerada, provavelmente, por um lençol de água ou depósito mineral.

Em 1929, após o desenvolvimento do método de investigação geofísica com pulsos eletromagnéticos, foi realizado o primeiro levantamento GPR para a determinação da espessura de uma geleira (STERN, 1929 apud Olhoeft, 1996).

As pesquisas, então, ficaram paralisadas e foram retomadas em 1970 com a corrida espacial lunar, onde o GPR se mostrou como um método de investigação robusto e prático, ao contrário, por exemplo, da sísmica, que exige maiores complicações logísticas.

Em 1972, é dado o lançamento do GPR no mercado, através, da criação da empresa norte americana, Geophysical Survey System Inc., por R. Morey e A. Drake, (MOREY,

1974).

A partir dessa década, o volume de pesquisas e trabalhos publicados aumentou consideravelmente, mostrando, atualmente, a versatilidade e aplicabilidade do método nas mais diferentes áreas, tais como: geologia (JOL; SMITH, 1995), geotecnia (DAVIS; ANNAN, 1989), planejamento urbano (DANIELS, 1989), geologia ambiental (PORSANI; RODRIGUES, 1995; PORSANI et al., 2004) e exploração mineral (TRAVASSOS; MENEZES, 2005; PORSANI et al., 2006), dentre outras aplicações.

3.3. Princípios Físicos

Durante a irradiação dos pulsos eletromagnéticos gerados pela antena transmissora do GPR, vários fenômenos ondulatórios ocorrem, tais como, a propagação, transmissão e reflexão do sinal. Tais fenômenos são regidos por vários fatores, como, as propriedades elétricas do solo (condutividade elétrica, permeabilidade magnética e permissividade dielétrica), impedância elétrica, frequência do pulso, conteúdo de água, geometria das estruturas em subsuperfície, etc.

O entendimento desses fenômenos durante a propagação no meio e interação da onda eletromagnética com as estruturas em subsuperfície é vital para a correta utilização do método e interpretação de dados, sendo assim, torna-se necessário o entendimento da teoria eletromagnética clássica de Maxwell.

O eletromagnetismo clássico descreve a geração e propagação de campos e ondas eletromagnéticas (campos elétricos e magnéticos acoplados), através de quatro leis físico-matemáticas:

A lei de Faraday, a lei de Ampère, a lei de Gauss para a eletricidade e a lei de Gauss para o magnetismo.

A lei de Faraday evidencia o fato de que, um campo magnético variável no tempo aplicado perpendicularmente sobre um corpo condutor, provoca neste, a movimentação de cargas elétricas mediante a geração de um campo elétrico paralelo ao deslocamento dessas cargas e ortogonal ao campo magnético variável aplicado. A eq.(3.1) mostra essa lei:

$$E = -\frac{dB}{dt}$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (3.4)$$

Onde:

\vec{E} vetor campo elétrico;

\vec{B} vetor indução magnético;

\vec{H} vetor campo magnético;

q densidade volumétrica de carga elétrica;

\vec{J} vetor densidade de corrente de condução;

\vec{D} vetor de deslocamento elétrico

Note que essas equações não fornecem as características físicas do meio, ou seja, as propriedades físicas que são essenciais para os métodos geofísicos eletromagnéticos, assim, para incluí-las é necessário associá-las às relações constitutivas. Para aplicá-las aos métodos EM, algumas considerações devem ser feitas, como por exemplo, adotar que a Terra se constitui como um meio isotrópico, horizontalmente estratificada e com extensão lateral infinita. As relações constitutivas traduzem a interação entre os campos eletromagnéticos de uma determinada fonte com um determinado meio, através, das propriedades físicas, como, condutividade elétrica (σ), permissividade dielétrica (ϵ) e permeabilidade magnética (μ).

Em termos físicos, essas relações representam a quantificação macroscópica do comportamento médio de elétrons, moléculas e íons, quando submetidos a campos eletromagnéticos externos (ANNAN, 1992).

A primeira relação constitutiva, conhecida, como lei de Ohm, eq.(3.5), relaciona o vetor densidade de corrente de condução ao vetor campo elétrico, através de um fator de proporcionalidade, denominado condutividade elétrica (σ), expresso em Siemens/metro

(S/m), o qual expressa a facilidade de um corpo em conduzir corrente elétrica. Segundo Keller (1987), vários fatores contribuem à variação da condutividade, dentre estes, a quantidade de água, porosidade, concentração de sais dissolvidos, argilas e minerais condutivos. O aumento de condutividade está intrinsecamente ligado à atenuação do sinal eletromagnético.

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (3.5)$$

A segunda relação constitutiva, relaciona o vetor deslocamento elétrico \vec{D} ao vetor campo elétrico \vec{E} , através do fator de proporcionalidade, denominado, permissividade dielétrica (ϵ), dada pela eq.(3.6):

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (3.6)$$

onde esse fator é comumente apresentado aos usuários GPR, como uma quantidade relativa, ou seja, $\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0}$, sendo que, ϵ_0 é o valor da permissividade dielétrica no vácuo ($\epsilon_0 = 8,854 \times 10^{-12}$ F/m) e ϵ é o valor da constante dielétrica no meio. A constante dielétrica expressa, em termos físicos, a quantidade de energia elétrica armazenada e perdida, através da criação de um campo elétrico interno (entre íons e/ou moléculas), devido a deslocamentos induzidos, quando moléculas e/ou íons são submetidos a um campo elétrico externo variável (OLHOEFT, 1996; POWERS, 1997).

Devido à presença de água em todos os materiais geológicos, à medida que a frequência da onda eletromagnética aumenta, a permissividade dielétrica da água também aumenta, chegando ao limite entre aproximadamente 10 GHz a 20 GHz, onde o efeito de relaxação é máximo, fazendo com que a molécula de água dissipe a energia acumulada na forma de calor (POWERS, 1997).

A terceira relação constitutiva é dada pela Equação (3.7), abaixo:

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (3.7)$$

relaciona o vetor de indução magnética \vec{B} e o vetor de campo magnético \vec{H} , através do fator de proporcionalidade μ , denominado, permeabilidade magnética, onde comumente esse fator é apresentado ao usuário de GPR, como medida relativa, dada por, $\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}$, sendo,

$$\mu_0 = 4\pi 10^{-7} \text{ H/m.}$$

Da mesma forma que a permissividade dielétrica, a permeabilidade magnética também é uma quantidade que expressa o acúmulo de energia, contudo, proveniente da indução magnética. Uma importante característica dessa propriedade é que ela praticamente não varia com a frequência, desse modo, a variação entre a permeabilidade magnética do meio e a do espaço livre não é significativa (OLHOEFT, 1981; KELLER, 1987).

Mediante as características das equações acima descritas, para analisar os fenômenos de propagação de ondas eletromagnéticas é utilizada a manipulação algébrica entre duas leis, a de Faraday e a de Ampère, chegando à equação de onda (equação de Helmholtz).

Para as antenas GPR empregadas (antenas biestáticas dipolares), considera-se que, grande parte do campo elétrico está paralela ao comprimento da antena (ROBERTS; DANIELS, 1996). Sendo assim, considera-se o campo elétrico E

Substituindo as equações (3.5), (3.6) e (3.7), nas equações, (3.1) e (3.2), temos:

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \sigma \vec{E} + \frac{\partial(\epsilon \vec{E})}{\partial t} \quad (3.8)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial(\mu \vec{H})}{\partial t} \quad (3.9)$$

Aplicando o operador rotacional na equação (3.9) e utilizando a identidade vetorial, eq. (3.10):

$$\vec{\nabla} \times \vec{\nabla} \times \vec{E} = \vec{\nabla}(\vec{\nabla} \cdot \vec{E}) - (\nabla^2 \vec{E}) \quad (3.10)$$

onde, $\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = 0$, obtemos:

$$\vec{\nabla} \times \vec{\nabla} \times \vec{E} = -\mu \frac{\partial(\vec{\nabla} \times \vec{H})}{\partial t} \quad (3.11)$$

que corresponde a:

$$\nabla^2 \vec{E} = -\mu \frac{\partial}{\partial t} \left[\sigma \vec{E} + \frac{\partial(\epsilon \vec{E})}{\partial t} \right] \quad (3.12)$$

Uma vez que os campos \vec{H} e \vec{E} variam harmonicamente, sob a forma:

$$\vec{E} \propto \vec{E}_0 e^{i\omega t} \quad (3.13)$$

$$\vec{H} \propto \vec{H}_0 e^{i\omega t} \quad (3.14)$$

tem-se que a derivada temporal da equação acima é:

$$\frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = i \omega \vec{E}_0 e^{i \omega t} \quad (3.15)$$

assim, a equação (3.12), torna-se a equação de Helmholtz:

$$\frac{\partial^2 \vec{E}_x}{\partial z^2} = [-i \omega \mu (\sigma + i \epsilon \omega)] \vec{E}_x \quad (3.16)$$

onde, $\omega = 2\pi f$, corresponde à frequência angular, sendo que f é a frequência da antena transmissora.

Ao termo que multiplica \vec{E}_x (eq. 3.16), chamamos de (k^2) , onde este é o número de onda, no qual, estão associadas todas as características elétricas e magnéticas de um determinado meio:

$$k^2 = [-i \omega \mu \sigma + \omega^2 \mu \epsilon]$$

A parcela, $-i \omega \mu \sigma$, da eq. (3.16), corresponde ao termo de atenuação da onda do radar, dominante nos métodos de baixas frequências, enquanto que a segunda parcela, $\omega^2 \mu \epsilon$, corresponde ao termo de propagação, dominante para as altas frequências. Portanto, em altas frequências, pode-se considerar que a propagação da onda eletromagnética é dada

principalmente pela corrente de deslocamento, ou seja,

sendo que, α corresponde à constante de atenuação e β à constante de propagação, ambas dadas por:

$$\alpha = \omega \sqrt{\frac{\mu \varepsilon}{2} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega \varepsilon} \right)^2} - 1 \right)} \quad (3.21)$$

$$\beta = \omega \sqrt{\frac{\mu \varepsilon}{2} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega \varepsilon} \right)^2} + 1 \right)} \quad (3.22)$$

e o termo, $\frac{\sigma}{\omega \varepsilon}$, corresponde à tangente de perdas, $\tan(\delta)$, onde δ é o ângulo da diferença de fase entre o campo elétrico e a densidade de corrente, o qual expressa as perdas de energia pelo transporte de cargas e relaxação da polarização, sendo obtidas, através da relação entre a corrente de condução, $\sigma \vec{E}$ e a corrente de deslocamento, $\omega \varepsilon \vec{E}$ (OLHOEFT, 1996).

De acordo com (DANIELS, 1989; ANNAN, 1992), pode-se considerar apenas a primeira parcela da eq. (3.19), ou seja, o termo que corresponde à propagação da onda na subsuperfície. Assim, após a substituição do termo (3.20) na equação (3.19) é obtida a seguinte expressão:

$$E_x(z, t) = E_0^+ e^{-\alpha z} e^{(\omega t - \beta z)} \quad (3.23)$$

Segundo Annan, 1992 e Daniels (1996), para o regime radiante do GPR, devido a sua alta frequência de operação, os valores de “ α ” eq.(3.21), “ β ” eq.(3.22) podem ser expressos,

como:

$$\begin{aligned}\alpha &= \frac{\sigma}{2} \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \\ &= \omega \sqrt{\mu \varepsilon}\end{aligned}\tag{3.24}$$

Tabela 3.1 – Valores de permissividade dielétrica (ϵ), condutividade elétrica (σ), velocidade de propagação (v) e constante de atenuação (α), determinados em materiais comuns para as frequências mais utilizadas no GPR (DANIELS, 1996)

Material	ϵ_r	σ (mS/m)	v (m/ns)	α (dB/m)
Água fresca	81	0,5	0,033	0,1
Ar	1	0	0,3	0
Argila	5 - 40	2 - 1000	0,06	1 - 300
Concreto	4-10	1-0,1	0,1	0,5-2,5
Metal	300	10^{10}	0,017	$9,5 \times 10^8$
PVC	3,3	0	0,11	0
Solo argiloso saturado	15	50	0,07 – 0,09	21
Solo argiloso seco	2,4	0,27	0,19	0,28

Conhecida, a propagação e a profundidade de investigação do método, torna-se necessário saber como se dá a reflexão, pois é através desta que os objetos ou estruturas geológicas são identificados.

Para o entendimento da reflexão são utilizadas, a lei de Snell - Descartes e as equações de Fresnel.

A lei de Snell rege os fenômenos de reflexão e transmissão de ondas eletromagnéticas em interfaces planas, através da óptica geométrica, criando uma dependência entre os ângulos de incidência, transmissão e reflexão e as respectivas propriedades elétricas, as quais determinam as características dos meios por onde se propagam os pulsos eletromagnéticos.

As equações de Fresnel quantificam as amplitudes dos campos elétricos refletidos e transmitidos nas interfaces planas-paralelas. Após, a energia ser refletida parte retorna à

posição onde se encontra a antena receptora, a qual registra o sinal. Os coeficientes de reflexão são definidos de acordo com a incidência do vetor campo elétrico sobre a superfície, assim, temos coeficientes de reflexão para o modo TE (Transverse Electric Mode – Modo Transversal Elétrico) e para o modo TM (Transverse Magnetic Mode – Modo Transversal Magnético).

Os coeficientes de reflexão de Fresnel para interfaces horizontais planas-paralelas são, portanto, definidos por:

$$R_{TE} = \frac{\cos(\theta_i) - \sqrt{\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1}} \sqrt{1 - \left(\frac{\epsilon_1}{\epsilon_2}\right) \text{sen}^2(\theta_i)}}{\cos(\theta_i) + \sqrt{\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1}} \sqrt{1 - \left(\frac{\epsilon_1}{\epsilon_2}\right) \text{sen}^2(\theta_i)}} \quad (3.29)$$

$$R_{TM} = \frac{-\cos(\theta_i) + \sqrt{\frac{\epsilon_1}{\epsilon_2}} \sqrt{1 - \left(\frac{\epsilon_1}{\epsilon_2}\right) \text{sen}^2(\theta_i)}}{\cos(\theta_i) + \sqrt{\frac{\epsilon_1}{\epsilon_2}} \sqrt{1 - \left(\frac{\epsilon_1}{\epsilon_2}\right) \text{sen}^2(\theta_i)}} \quad (3.30)$$

onde, R_{TE} e R_{TM} são, respectivamente, os coeficientes de reflexão para os modos TE e TM e as constantes ϵ_1 e ϵ_2 correspondem, por exemplo, às permissividades dielétricas do meio 1(background) e 2 (alvo de interesse).

Devido, ao pequeno offset (separação entre as antenas transmissora e receptora), o ângulo θ_i pode ser aproximado para $\theta_i \approx 0$ (ANNAN, 1992). Assim, as equações (3.29) e (3.30), se reduzem à:

$$R_{TE} = R_{TM} = \frac{\sqrt{\epsilon_1} - \sqrt{\epsilon_2}}{\sqrt{\epsilon_1} + \sqrt{\epsilon_2}} \quad (3.34)$$

3.4. Polarização

Em uma aquisição GPR, assim, como em outras metodologias geofísicas, o objetivo final é conseguir o melhor resultado para a partir desse realizar uma interpretação satisfatória. A obtenção de uma boa resposta, ou seja, de um bom padrão de reflexão dos alvos e estruturas inicia-se no planejamento da aquisição e nesse momento o usuário deve ter em mente os diversos fatores que influenciam na boa resposta, tais como, a combinação entre as polarizações das antenas (transmissora e receptora) e a do alvo, a geometria e composição das estruturas, profundidade, características geológicas da área, etc.

De todos os fatores citados, um dos mais importantes, mas que, no entanto é desconsiderado por grande parte dos usuários de gpr é a combinação entre as polarizações das antenas (transmissora e receptora) e dos alvos, pois a correta aplicação desse conceito é decisiva na geração de uma boa resposta, sendo assim, a consideração desse fator se torna relevante desde o planejamento da aquisição à interpretação dos resultados.

Dessa maneira, em vista da importância do fenômeno de polarização, segue uma breve descrição a respeito.

Dá-se o nome de polarização à grandeza vetorial que descreve a magnitude e direção dos campos, elétrico e magnético, de uma onda eletromagnética que se propaga no espaço e no tempo. Durante a sua propagação, tanto a direção quanto magnitude mudam em função do tempo e quando essa variação temporal é dada senoidalmente, classifica-se esse tipo de campo EM como harmônico. Por convenção, a IEE - Institution of Electrical Engineers descreve que a polarização de campos EM harmônicos é dada através da análise da direção

vibracional do campo elétrico.

Como consequência dos campos serem harmônicos, três estados de polarizações tornam-se possíveis, o linear, o elíptico e o circular, cada um com suas características, sendo que o linear e o circular são considerados casos particulares da polarização elíptica (ZEBKER, et al, 1987).

Como geralmente o usuário GPR não tem conhecimento suficiente das estruturas em subsuperfície, torna-se praticamente impossível estabelecer uma combinação otimizada entre as polarizações das antenas e das estruturas. No entanto, de todos os fatores citados, o único que o usuário tem total controle é aquele com respeito à combinação entre as polarizações das antenas, transmissora e receptora, uma vez que estas são dispostas sobre a superfície pelo operador. Sendo assim, este pode remediar essa situação tentando otimizar a combinação entre as polarizações das antenas, através dos arranjos de antenas.

No estudo com gpr, a polarização da onda EM é regida essencialmente pelo tipo de antena utilizada, ou seja, pelo tipo do estado de polarização predominante neste equipamento. No mercado existem diversos tipos de antenas que são utilizadas em sistemas gpr, no entanto, a mais comercializada é o conjunto de antenas, transmissora e receptora, do tipo dipolar que pode ser blindada ou não e que possui polarização preferencialmente linear, ou seja, possui o vetor de campo elétrico principal alinhado ao eixo da antena (SMITH, 1984). Na literatura existem diversos trabalhos a respeito dos vários modos de arranjos de antenas, entre os mais citados, está o trabalho clássico de Peter Annan (ANNAN, 1992), o qual descreve sobre esses vários modos para arranjos de antenas bi-estáticas. A Figura 3.1 mostra os possíveis arranjos de antenas que podem ser empregados durante um levantamento em campo. No entanto, essa nomenclatura não está normatizada, ou seja, não é padronizada para o estudo GPR, como pode ser visto, através das notações também escritas na Figura 3.2, as quais são utilizadas nos seguintes trabalhos, (BALANIS, 1989; LUZITANO; ULRICH, 1994; RADZEVICIUS,

2001; LUTZ; PERROUD, 2004).

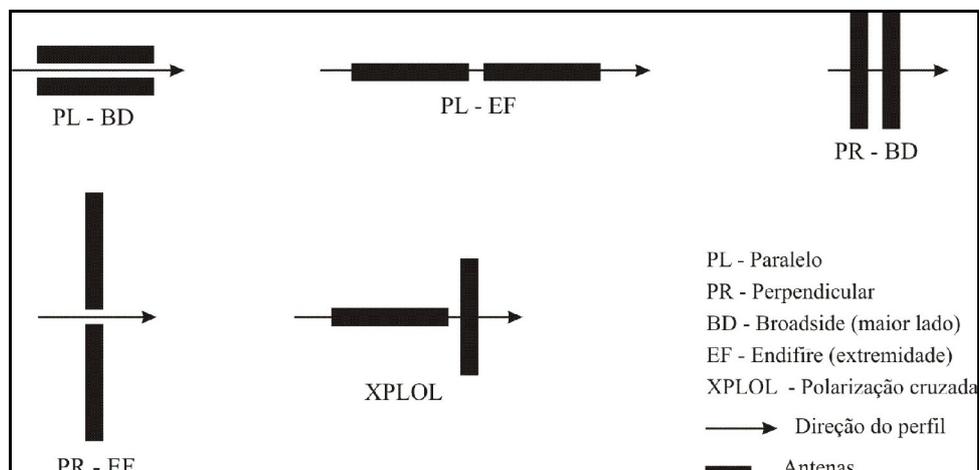


Figura 3.1 – Arranjos de antenas (adaptado de Annan, 1992)

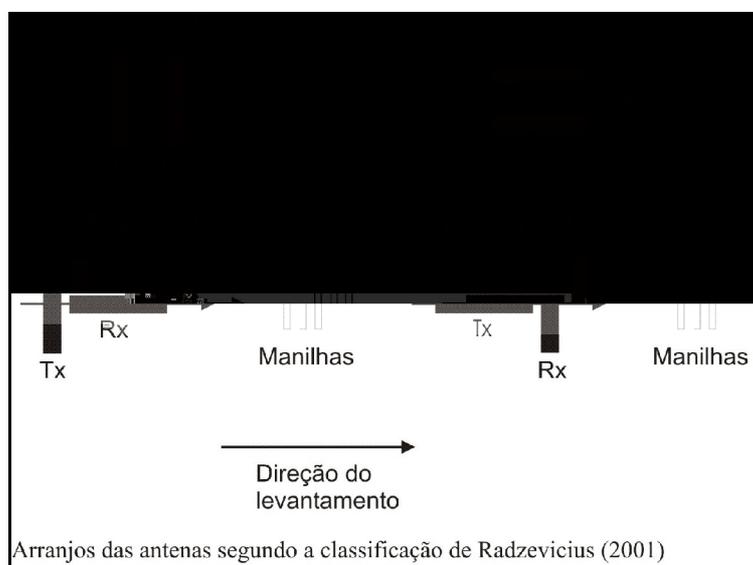


Figura 3.2 – Arranjos de antenas (adaptada de Radzevicius, 2001 e outros)

Enquanto, as notações da Figura 3.1 são definidas com relação ao plano de incidência, ou seja, para uma antena transmissora que estiver perpendicular ou paralela ao caminhamento, estes arranjos são chamados, TE e TM, respectivamente. Já para a Figura 3.2 as nomenclaturas dos arranjos são definidas de acordo com a orientação do campo elétrico da antena transmissora em relação ao comprimento dos alvos na subsuperfície, caso o objeto possua uma direção preferencial.

Dessa maneira, para evitar conflitos com relação às aquisições e interpretações dos resultados, foram estabelecidas as notações de arranjos mostradas na Figura 3.3, as quais são orientadas em relação às coordenadas (x, y) e que serão utilizadas daqui em diante.

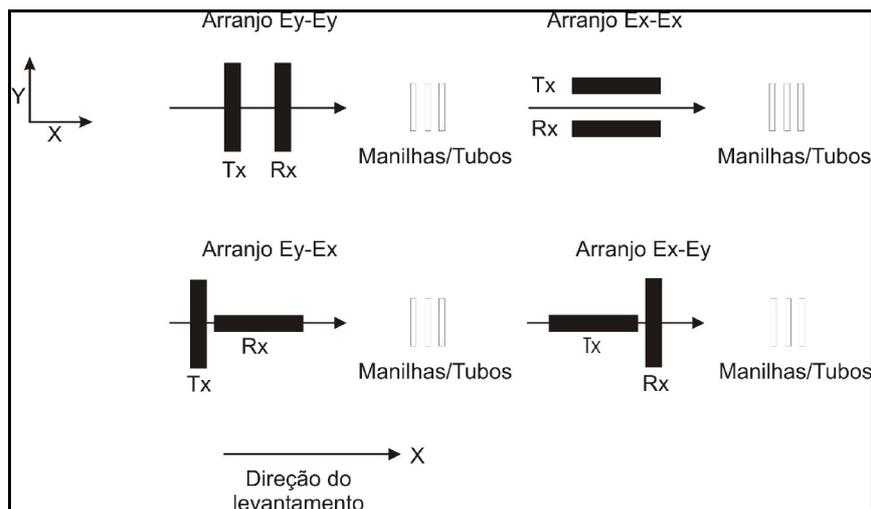


Figura 3.3 – Arranjo de antenas utilizado nas aquisições de campo.

Dos tipos básicos apresentados nas figuras acima, dois tipos são tidos como principais, pois apresentam uma ótima relação entre as polarizações das antenas, transmissora e receptora (ANNAN, 1992). São eles: o arranjo Ex-Ex, onde ambas as antenas estão paralelas entre si e ao deslocamento no perfil e o arranjo Ey-Ey, onde ambas as antenas estão paralelas entre si e perpendiculares ao caminhamento no perfil.

O fato desses dois tipos de arranjos serem os preferenciais para o emprego do GPR é justificado pelos seus padrões de radiação e acoplamento junto ao solo (ANNAN, 1973; ANNAN et al, 1975; SMITH, 1984), os quais são mostrados na Figura 3.4.

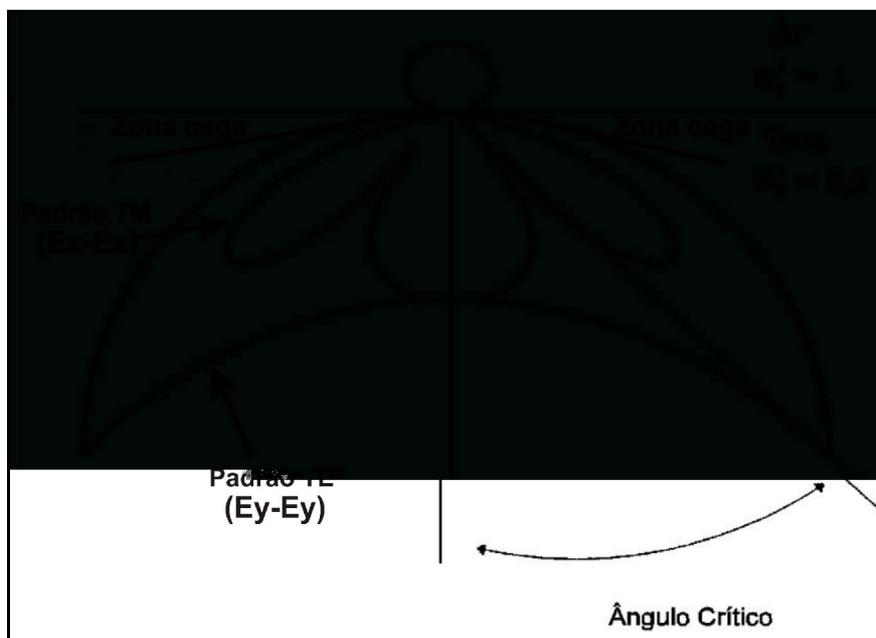


Figura 3.4 – Padrões de radiação TE (Ey-Ey) e TM (Ex-Ex) (adaptada de Annan, 1992)

Como pode ser visto, o modo TE (Ey-Ey) possui um padrão de radiação que abrange maior profundidade e área lateral, quando comparado ao padrão TM (Ex-Ex). Devido a isso, a maioria dos usuários de GPR opta pelo modo TE (Ey-Ey), uma vez que, teoricamente, esse modo de aquisição proporciona uma maior amplitude dos refletores, devido a maior área de pegada das antenas.

Contudo, essa característica é perfeitamente aplicável a estruturas acamadadas, plano-paralelas. Entretanto, para estruturas onde a geometria possui outra forma, como por exemplo, esférica ou cilíndrica, a aplicação desse modo não garante a melhor visualização do alvo, pois o fator que agora passa a influenciar é a combinação entre as polarizações do sinal espalhado pela superfície do refletor e a da antena receptora (RADZEVICIUS, 2001). Dessa maneira, há necessidade de uma aquisição multicomponente, ou seja, torna-se necessário o emprego de dois ou mais arranjos de antenas, a fim de integrar os resultados obtidos e estabelecer a interpretação mais coerente.

CAPÍTULO 4

MODELAGENS NUMÉRICAS GPR 2 D

Neste capítulo são descritos brevemente os princípios físicos e matemáticos envolvidos no método das diferenças finitas no domínio do tempo, o qual é utilizado no software Reflexw. Também são mostrados os resultados das modelagens para as duas linhas do SCGR, a de manilhas de concreto e a de tubulações de PVC.

4.1. O método FDTD e características do software Reflexw

O método das Diferenças Finitas no Domínio do Tempo (FDTD - *Finite Difference Time Domain*), é um dos vários métodos computacionais que visam resolver numericamente as equações diferenciais de Maxwell que descrevem a propagação, transmissão e espalhamento das ondas eletromagnéticas em um meio qualquer e que na maioria dos casos estão submetidos a condições de contorno (WEXLER, 1969).

O FDTD, criado em 1966 por Yee (YEE, 1966), foi baseado em um método de resolução numérica de equações, já existente, conhecido como método das diferenças finitas (FDM – *Finite Difference Method*) criado por Thom (THOM, 1920 in LIMA, 2006). O

método FDM consiste em uma técnica de aproximações sucessivas que transforma as equações diferenciais em equações discretizadas ou finitas, através do conceito da aproximação da derivada central de um ponto, representado pela (Figura 4.1) e Equação 4.1. A diferença entre este método e o FDTD é que este último é acrescido do incremento temporal Δt (Equação 4.2) e expandido em série de Taylor até atingir um erro estipulado pelo truncamento, após um dado número de interações.

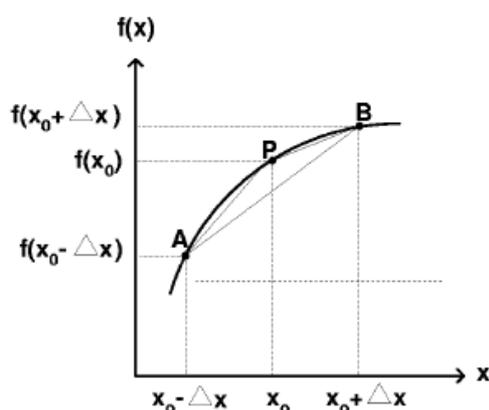


Figura 4.1– Gráfico para definição genérica de derivada central de um ponto para uma função $f(x)$ em um ponto P qualquer.

$$\frac{\partial f(x_0)}{\partial x} \approx \frac{f(x_0 + \Delta x) - f(x_0 - \Delta x)}{2\Delta x} \quad (4.1)$$

$$F^n(i, j, k) = F(i\Delta, j\Delta, k\Delta, n\Delta t) \quad (4.2)$$

Portanto, a derivada da equação acima, Equação. 4.2, é dada por:

$$\frac{\partial F^n(i, j, k)}{\partial x} = \frac{F^n(i + 1/2, j, k) - F^n(i - 1/2, j, k)}{\Delta} + \text{Er}(\Delta^2) \quad (4.3)$$

$$\frac{\partial F^n(i, j, k)}{\partial t} = \frac{F^{n+1/2}(i, j, k) - F^{n-1/2}(i, j, k)}{\Delta t} + \text{Er}(\Delta t^2) \quad (4.4)$$

onde $\Delta = \Delta x = \Delta y = \Delta z$, são os incrementos espaciais.

O trabalho de Yee está representado nas equações 4.2, 4.3 e 4.4, as quais mostram que todas as componentes dos campos elétrico \vec{E} e \vec{H} , ou seja, E_x , E_y , E_z e H_x , H_y , H_z , são tratadas diretamente no domínio do tempo, através do parâmetro Δt e são discretizadas através do número de iterações n , que corresponde ao número de ciclos no tempo Δt . Tal discretização é realizada através de uma malha geométrica, conhecida como célula de Yee (Figura. 4.2), que no caso da modelagem empregada restringiu-se ao aspecto bidimensional.

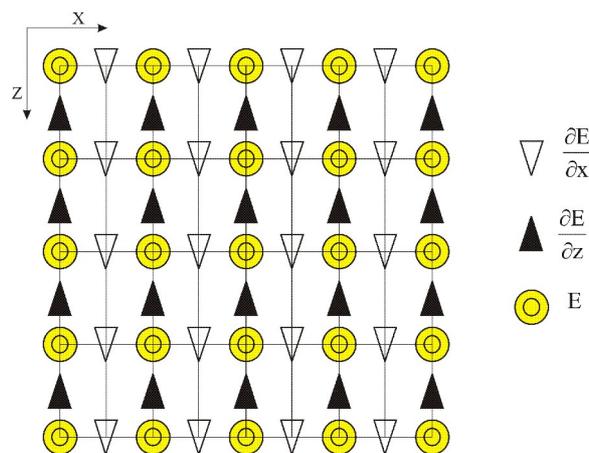


Figura 4.2 – Malha geométrica implementada no software Reflexw, conhecida como célula bidimensional de Yee.

Para que seja garantida a estabilidade do método o incremento temporal Δt deve respeitar a seguinte relação:

$$\Delta t \leq \frac{\Delta x}{\sqrt{V_{\text{MÁX}} \cdot N}} \quad (4.5)$$

onde, Δt depende do incremento espacial Δx , da velocidade de fase máxima da onda eletromagnética no meio dada por $V_{\text{MÁX}}$ e do parâmetro N que corresponde à dimensão espacial utilizada no modelo, no caso, N utilizado foi igual a 2.

É importante salientar que o incremento espacial Δx está intimamente ligado ao comprimento de onda mínimo presente no meio e segundo (TAFLOVE et al, 1989), esse incremento deve ser no mínimo 10 vezes menor que o menor comprimento de onda existente no sistema. Erros na escolha dos parâmetros, espacial e temporal podem ocasionar dispersão numérica (SANDMEIER, 2004).

Outro fator importante para a utilização eficiente do programa Reflexw é o uso das condições de contorno absorventes. Embora, em muitas situações reais a área de estudo possua extensão infinita em algumas direções, quando o algoritmo computacional FDTD é implementado é necessário limitar o domínio do cálculo, visando diminuir a memória computacional requerida. Para isso, são utilizadas condições nos limites da malha as quais simulam propagações no infinito, evitando dessa maneira reflexões espúrias das ondas que incidam nas paredes absorventes, tais condições são chamadas de condições de contorno absorventes (TAFLOVE, 1980).

Nas modelagens com o software Reflexw essa condição foi estabelecida pelo parâmetro *linear absorbing range*, o qual, segundo Sandmeier (2004) seu calculo é estipulado pela expressão (4.6):

$$\sigma_{\text{end}} = \text{fac} \omega \epsilon_{\text{act}} \epsilon_0 \quad (4.6)$$

onde,

σ_{end} é a condutividade final com relação ao ϵ_{act} ;

ω é a frequência angular;

ϵ_{act} é o valor atual de ϵ do último ponto do modelo antes do limite;

ϵ_0 é a permissividade dielétrica do vácuo;

$\text{fac} = \frac{\text{Size}}{50}$, onde Size é o número de pontos do grid.

Para as duas linhas em estudo, linha de manilhas de concreto e linha de tubos de pvc, as modelagens GPR 2D foram realizadas utilizando duas frequências de antenas, 100 MHz e 200 MHz. Os arranjos de antenas utilizados nas modelagens foram configurados simulando o deslocamento do par, transmissor-receptor na direção x, primeiramente utilizando a fonte transmissora com a componente dominante Ey e o registro do sinal com a mesma polarização Ey (Ey-Ey), em seguida a fonte empregada foi a componente Ex com o registro também em Ex (Ex-Ex).

Para simular as reflexões da onda eletromagnética (Ex-Ex e Ey-Ey) pela superfície do refletor foi empregada como fonte eletromagnética o modo, *exploding reflector*, que se caracteriza pela emissão da frente de onda espalhada diretamente pelo alvo em direção a superfície. Esta fonte equivale à etapa de migração dos dados (YILMAZ, 1987). Esse tipo de fonte permite simular uma seção 2D zero offset o que significa, que iniciado o tempo em $t = 0$ todos os pontos originários de um refletor são os pontos iniciais de uma onda elementar de Huygens com uma amplitude proporcional ao coeficiente de reflexão para o caso de uma incidência normal (SANDMEIER, 2004).

As modelagens geradas para as linhas de manilhas de concreto e tubos de pvc foram realizadas inserindo cada um de seus alvos dentro de um meio geológico composto de aterro caracterizado por uma espessura de argila inferior a 3m de profundidade (PORSANI et al., 2004). Um modelo 2D foi construído inserindo-se os alvos e a geologia onde eles estão

contidos, através de suas propriedades físicas, tais como, condutividade elétrica (σ), permissividade dielétrica (ϵ) e permeabilidade magnética (μ), bem como suas respectivas geometrias e dimensões. A seguir, são apresentadas as propriedades físicas dos alvos utilizados nas construções dos modelos. As Tabelas 4.1 e 4.2 mostram, respectivamente, as propriedades físicas das linhas de tubos de pvc e manilhas de concreto utilizadas nas construções dos modelos. Todos os alvos localizados nas linhas de manilhas de concreto e tubos de pvc estão dispostos horizontalmente com exceção de um único alvo, localizado na linha de manilhas, na posição 9m e profundidade de 1m que está disposto verticalmente.

As propriedades físicas utilizadas foram extraídas da literatura (ANNAN, 1992; DANIELS, 1996; ZENG & MCMECHAN, 1987).

Tabela 4.1 – Propriedades físicas dos materiais que constituem a linha de tubos de pvc.

Material	ϵ_r	μ_r	σ (S/m)
Solo	20	1	10^{-2}
Pvc	3,3	1	0
Ar	1	1	0
Água de torneira	81	1	0,0005
Cano metálico guia	300	100	10^{10}

Tabela 4.2 – Propriedades físicas dos materiais que compõem a linha de manilhas de concreto.

Material	ϵ_r	μ_r	σ (S/m)
Solo	20	1	10^{-2}
Manilha de Concreto	5	1	0
Manilha de concreto com armação de ferro	5	1	10^{-3}
Ar	1	1	0
Cano metálico guia	300	100	10^{10}

As posições e profundidades dos alvos das linhas de manilhas de concreto e tubos de pvc introduzidas no modelo foram retiradas das Tabelas 2.1 e 2.2. A Tabela 4.3 apresenta as dimensões dos alvos, introduzidos nos modelos.

Tabela 4.3 – Dimensões dos alvos instalados nas linhas de tubos de pvc e manilhas de concreto.

Objeto	Diâmetro externo (m)	Diâmetro interno (m)	Espessura (m)
Tubo de pvc	0,136	0,120	0,008
Manilha de concreto	0,70	0,60	0,05
Manilha de concreto	0,48	0,40	0,04
Manilha de concreto	0,26	0,20	0,03
Cano metálico guia	0,038	0,0354	0,0013

Os parâmetros utilizados para as modelagens foram: frequência de 100 MHz e 200 MHz para a fonte de ondas eletromagnéticas, arranjos de antenas Ey-Ey e Ex-Ex e espaçamento entre traços iguais a 0,2m, 0,1m e 0,01m a partir destes foram gerados valores de Δt iguais à 0,3333ns, 0,1667ns e 0,01667ns, respectivamente. Esses valores são independentes das frequências empregadas, variando apenas com os parâmetros que constam na inequação (4.5).

4.2. Resultados das modelagens

4.2.1. Linha de tubos de pvc

A Figura 4.3 mostra o modelo GPR 2D construído a partir da posição real dos alvos instalados na linha de tubos de pvc do SCGR. Através, deste modelo de entrada foram modeladas várias aquisições com deslocamentos de antenas na direção x, visando estudar e

estabelecer os melhores padrões de refletores, através da mudança dos seguintes parâmetros, espaçamento entre traços, a frequência de operação e arranjos de antenas Ey-Ey e Ex-Ex com offset constante.

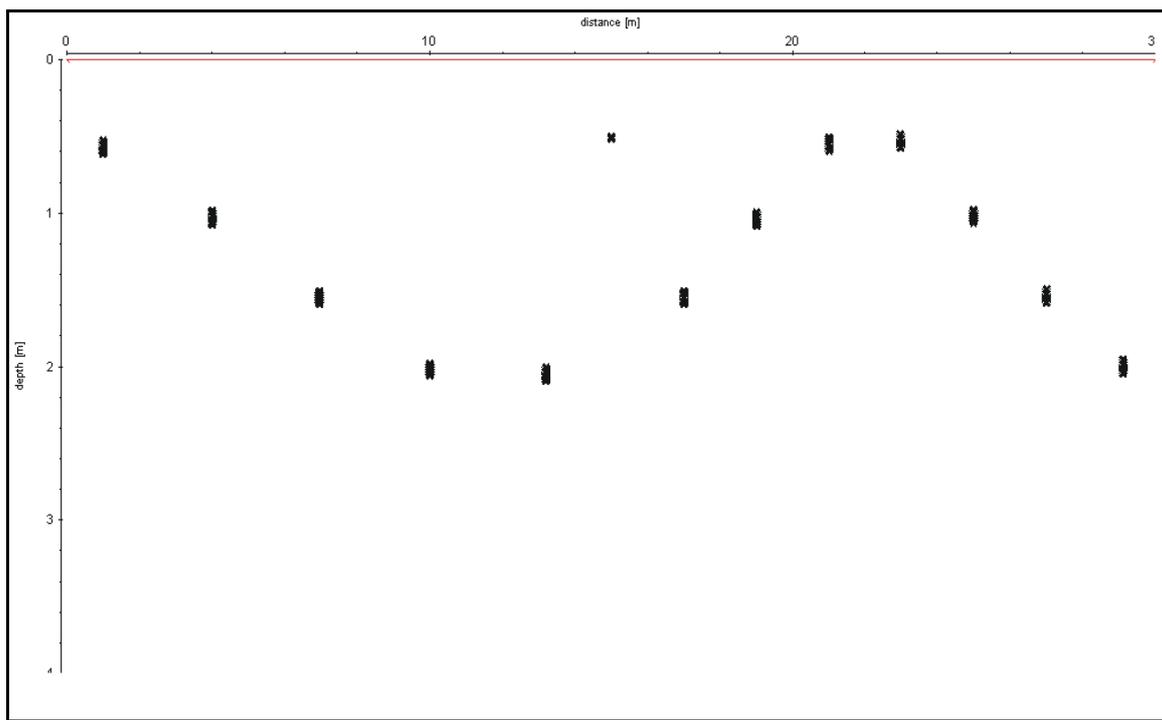


Figura 4.3 - Modelo GPR 2D dos alvos instalados na linha de tubos de PVC.

Nesta linha os quatro primeiros tubos estão totalmente preenchidos por água, os quatro seguintes estão parcialmente preenchidos, ou seja, metade por água e metade vazia e os quatro restantes estão totalmente vazios.

Visando simular aquisições GPR mais rápidas, aliando, profundidade de investigação com a resolução dos alvos, primeiramente foram simuladas as aquisições utilizando, espaçamento entre traços de 0,2m e frequência de operação de 100MHz. Sendo que, para esta frequência, devido à boa propagação, foi utilizada uma janela de temporal igual a 150ns.

A Figura 4.4 mostra o resultado da modelagem feita com arranjo Ey-Ey, frequência de 100MHz e espaçamento entre traços igual a 0,2m.

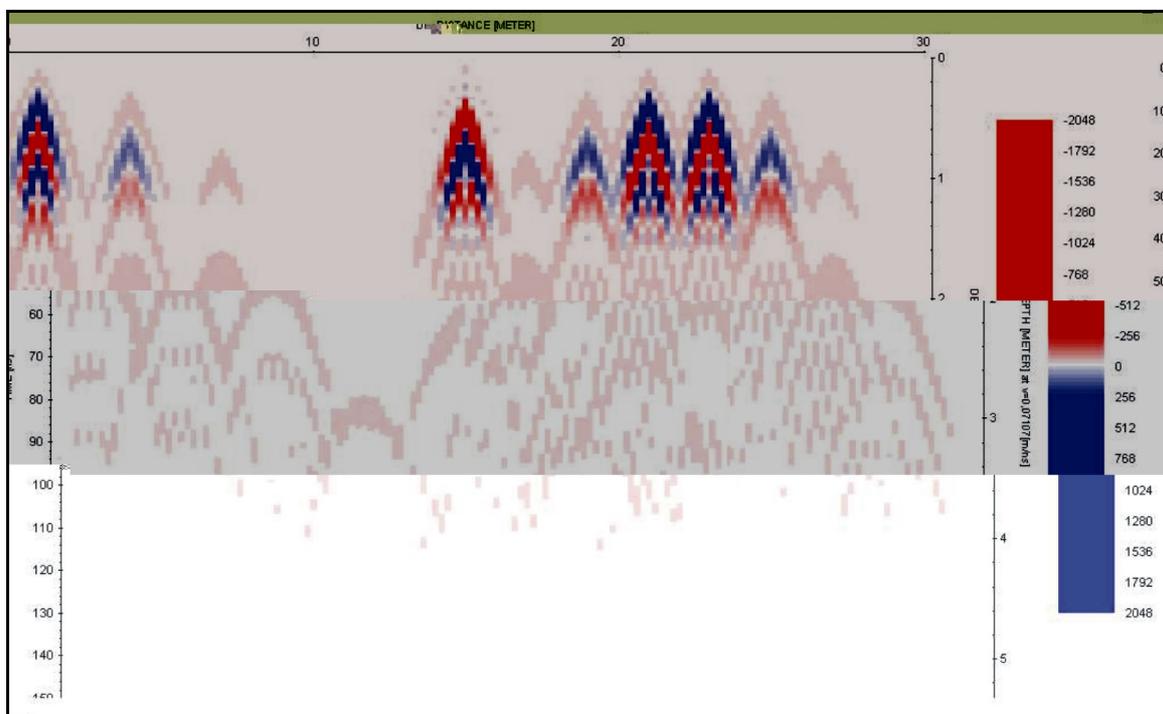


Figura 4.4 - Modelagem da linha de tubos de pvc utilizando arranjo de antenas Ey-Ey, espaçamento entre traços de 0,2m e frequência de 100 MHz.

Como pode ser notada, a modelagem executada com os parâmetros descritos não proporcionou uma boa qualidade da imagem, apenas os refletores mais superficiais foram possíveis de serem visualizados, mesmo assim, de maneira não nítida.

Para melhorar o imageamento das estruturas, a modelagem apresentada a seguir, (Figura 4.5) foi realizada com os mesmos parâmetros usados anteriormente, com a diferença que o espaçamento entre traços agora utilizado foi igual a 0,1m.

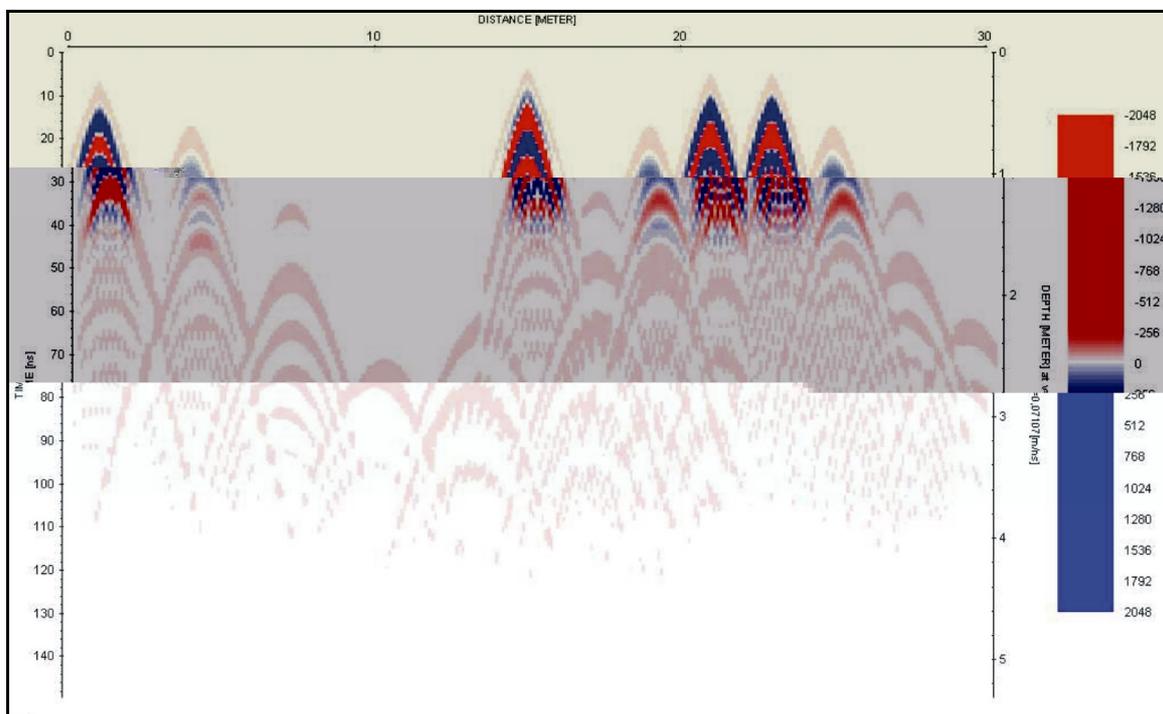


Figura 4.5 - Modelagem com arranjo antenas Ey-Ey, espaçamento entre traços de 0,1m e frequência de 100 MHz.

Com a alteração do espaçamento entre traços de 0,2m para 0,1m houve uma razoável melhoria na qualidade da imagem, ou seja, os alvos que anteriormente foram vistos na Figura 4.4 são vistos agora com maior delineamento das hipérboles.

Os parâmetros empregados nas duas modelagens apresentadas anteriormente podem ser utilizados tanto em aquisições no modo passo a passo, quanto, em aquisições no modo contínuo. A Figura 4.6 mostra a modelagem com espaçamentos entre os traços de 0,01m, arranjos de antenas Ey-Ey e frequência de 100MHz.

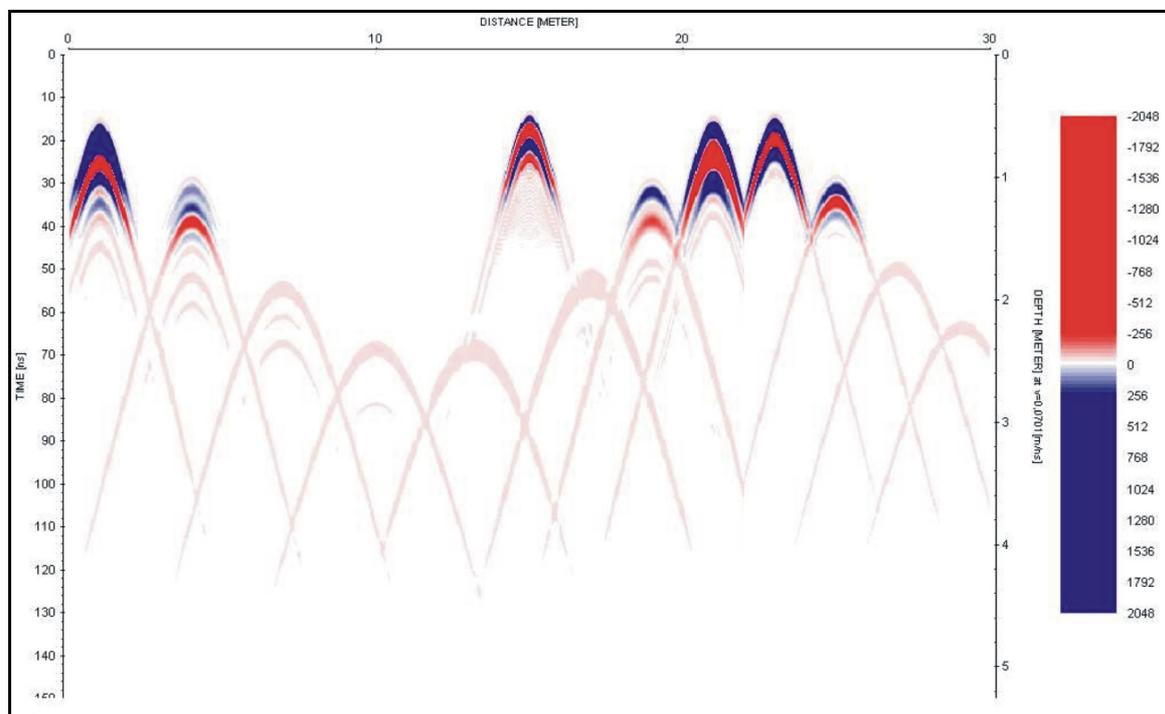


Figura 4.6 - Modelagem com arranjo de antenas Ey-Ey, espaçamento entre traços de 0,01m e frequência de 100 MHz.

Com a aplicação do espaçamento entre traços igual a 0,01m ocorreu uma grande melhoria na imagem dos objetos quando comparada às imagens das modelagens feitas com espaçamento entre traços maiores. Nota-se também que os alvos que são melhores imageados são aqueles presentes mais superficialmente, devido à atenuação da onda eletromagnética ser dependente da profundidade, mas nem por isso os alvos mais profundos deixaram de serem mostrados. Sendo assim, o parâmetro ótimo para o espaçamento entre traços está definido como 0,01m.

Até o presente momento foram realizadas modelagens apenas no modo Ey-Ey. Agora, com o parâmetro ótimo de espaçamento entre traços determinado é apresentada a modelagem Figura 4.7, na qual foi utilizado o arranjo de antenas Ex-Ex com frequência de 100MHz e espaçamento entre traços igual a 0,01m.

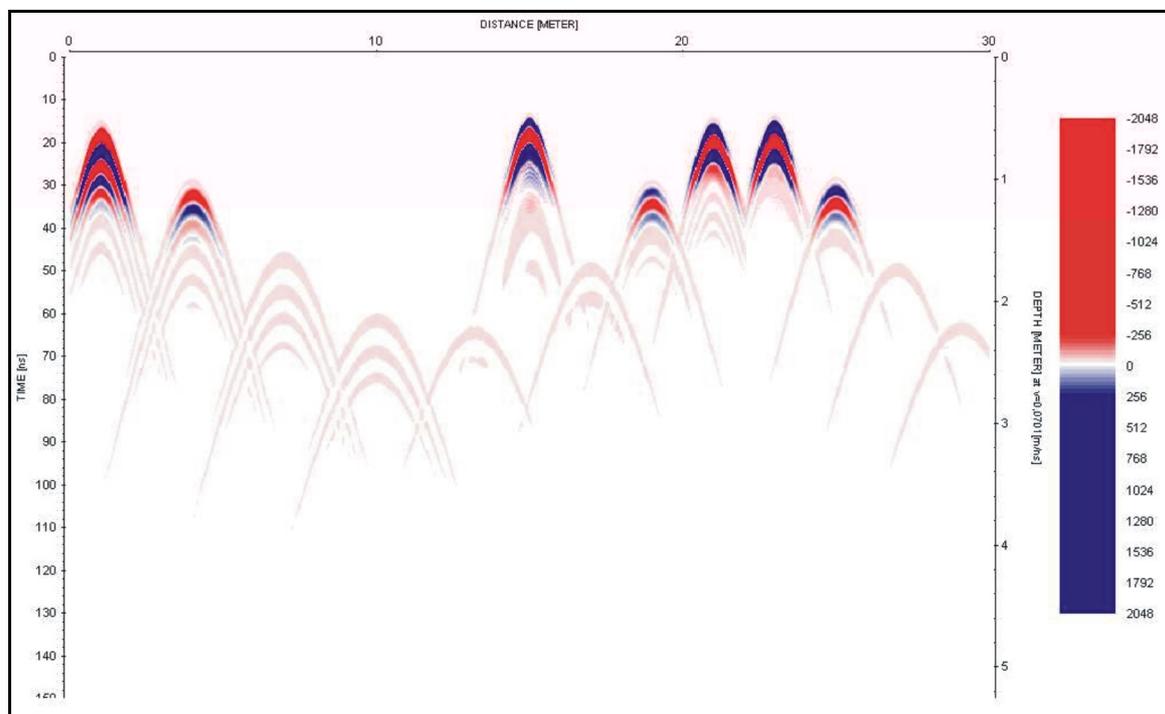


Figura 4.7 - Modelagem com arranjo de antenas Ex-Ex, espaçamento entre traços de 0,01m e frequência de 100 MHz.

Esta modelagem obteve padrões de reflexões similares à da Figura 4.6, com exceção dos alvos A e B, os quais são preenchidos com água de torneira. Estes alvos mostraram polaridades invertidas, quando comparadas às demais reflexões. Esse fenômeno pode ser uma ótima ferramenta para distinguir tubos preenchidos por água de tubos parcialmente preenchidos e vazios.

Até o momento, foram determinadas informações provenientes apenas do topo dos alvos e nenhuma informação a respeito da possível identificação da base desses objetos. Sendo assim, para investigar a possibilidade de se obter imagens com maior resolução e possível identificação da base desses objetos é que é apresentada na Figura 4.8 a modelagem realizada com frequência de 200MHz, visando aumentar a resolução dos objetos em estudo.

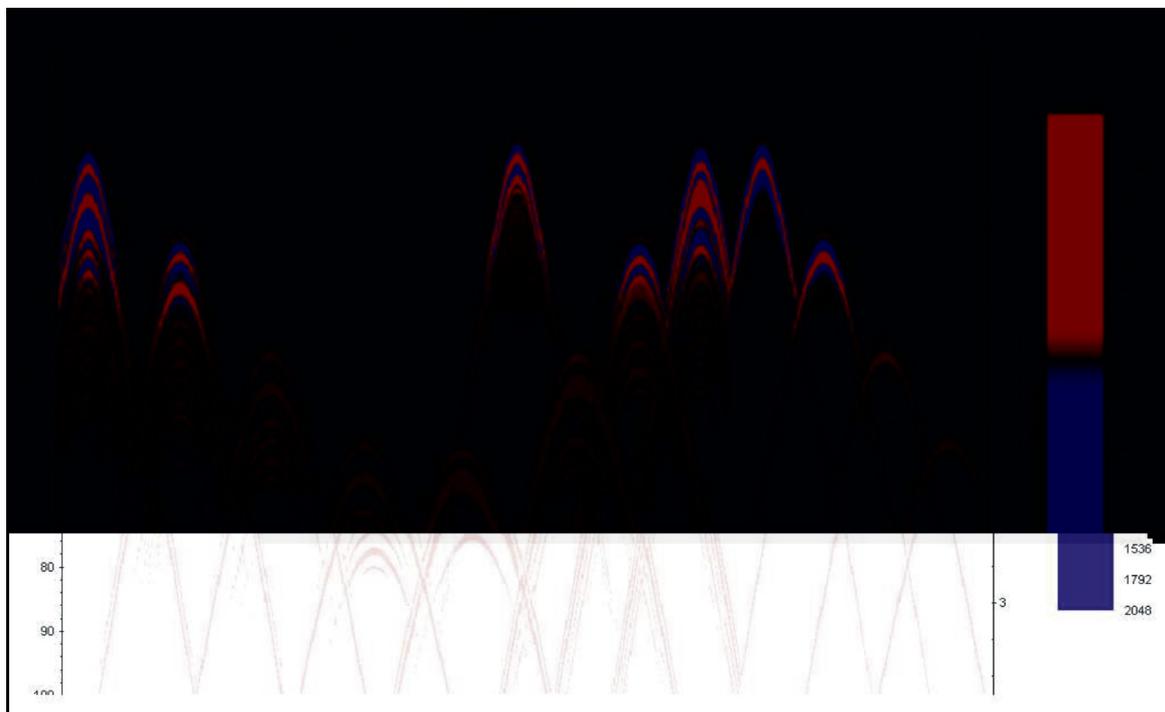


Figura 4.8 - Modelagem com arranjo de antenas Ey-Ey, espaçamento entre traços de 0,01m e frequência de 200 MHz.

Com o emprego da frequência de 200MHz, também houve uma boa identificação dos alvos preservando a hierarquia de que os alvos mais superficiais são melhores mostrados do que os mais profundos. No entanto, nesta modelagem são apresentadas algumas características que anteriormente não foram vistas nas modelagens realizadas com frequências de 100MHz.

Com o uso da frequência de 200 MHz nota-se que os padrões de reflexões desses alvos superficiais estão diferentes entre si. Isso pode ser comprovado, através, da análise dos alvos localizados nas posições 1m, 21m e 23m, os quais são respectivamente, preenchidos por água, parcialmente preenchidos por água e vazio.

Para o alvo localizado na posição 1m existe uma reverberação bem pronunciada, provavelmente causada devido ao forte contraste de impedância elétrica, causado pela grande diferença entre as permissividades dielétricas do tubo de pvc e da água. Fenômeno semelhante

ocorre com o alvo localizado na posição 21m, o qual apresenta uma hipérbole de reflexão bem pronunciada, porém com menor reverberação. Esse fato pode ser também explicado devido à presença de interfaces com diferentes valores de permissividade dielétrica, uma vez que três interfaces compreendem o objeto, sendo que a primeira é a interface pvc-ar, a qual possui permissividades dielétricas próximas, a segunda é a interface ar-água, a qual possui permissividades dielétricas com grande contraste e a terceira compreende a interface água-pvc, que também apresenta grande contraste de permissividade dielétrica. Já o tubo localizado na posição 23m (vazio) apresenta uma hipérbole também nítida, no entanto, “curta”, ou seja, sem reverberação, devido à velocidade com que a onda eletromagnética viaja dentro do objeto, uma vez que a permissividade dielétrica do ar é igual a 1.

Para verificar se o efeito da inversão da polaridade mostrada na modelagem da Figura 4.7 também ocorre em outras frequências, agora é apresentada a modelagem Figura 4.9, realizada com arranjos de antenas Ex-Ex, frequência de 200MHz e espaçamento entre traços igual a 0,01m.

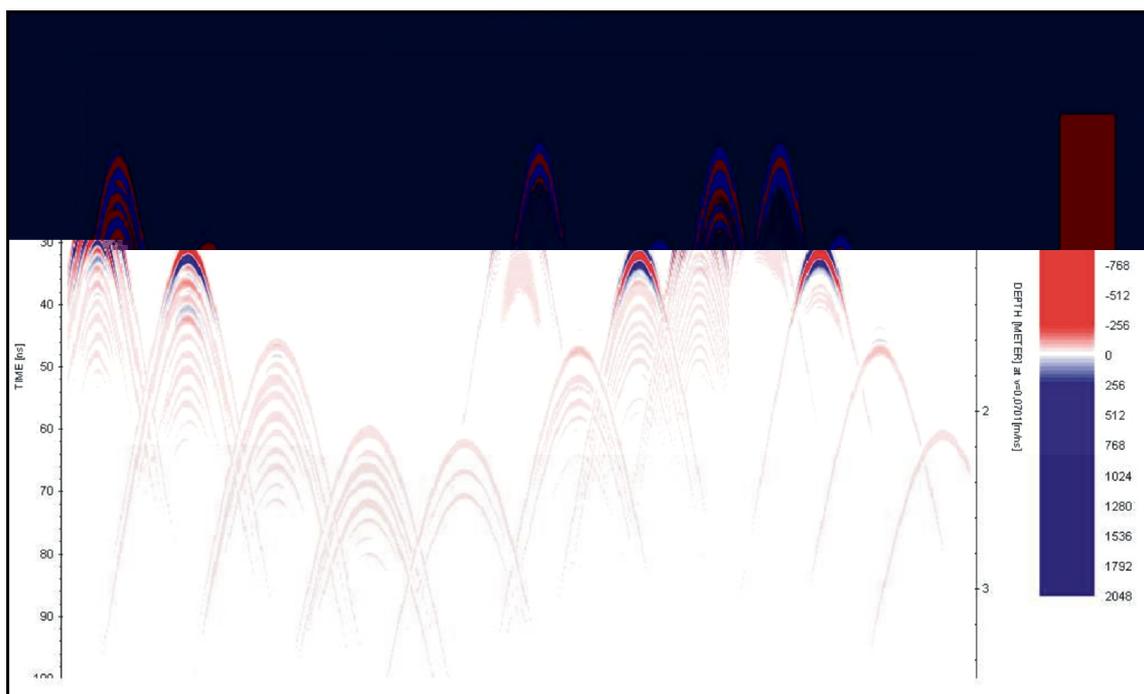


Figura 4.9 - Modelagem com arranjo de antenas no modo Ex-Ex, espaçamento entre traços de 0,01m e frequência de 200 MHz.

Todos os refletores visualizados nas modelagens com espaçamento de 0,01m são observados na modelagem Figura 4.9, inclusive, o fenômeno da diferença de polaridade do pulso, proveniente, dos topos dos tubos preenchidos por água e parcialmente preenchidos, presentes na modelagem Figura 4.7. Devido à mudança do arranjo de antenas de Ey-Ey para Ex-Ex, os refletores correspondentes aos tubos preenchidos por água apresentaram inversão de polaridade em relação aos outros alvos. Esta é mais uma ótima informação, pois se torna possível, através desses resultados identificar e diferenciar com maior segurança objetos, preenchidos, semi preenchidos e vazios.

4.2.2. Linha de manilhas de concreto

A Figura 4.10 mostra o modelo GPR 2D construído a partir do posicionamento real dos alvos de manilhas de concreto em subsuperfície. Neste estudo, assim como o realizado com a linha de tubos de pvc, foram estudados os padrões das reflexões obtidas como respostas dos diversos alvos, em termos da mudança dos seguintes parâmetros, arranjos de antenas e frequência de operação das antenas. No estudo dessa linha não foram empregados todos os espaçamentos entre traços aplicados na linha de tubos de pvc, pois, mediante os testes realizados ficou comprovado que o parâmetro ótimo é 0,01m e por isso, apenas esse será utilizado. Sendo assim, as Figura 4.11 e 4.12, correspondem, respectivamente às modelagens executadas com os arranjos de antenas Ey-Ey e Ex-Ex, ambas com frequências de 100MHz e espaçamento entre traços de 0,01m.

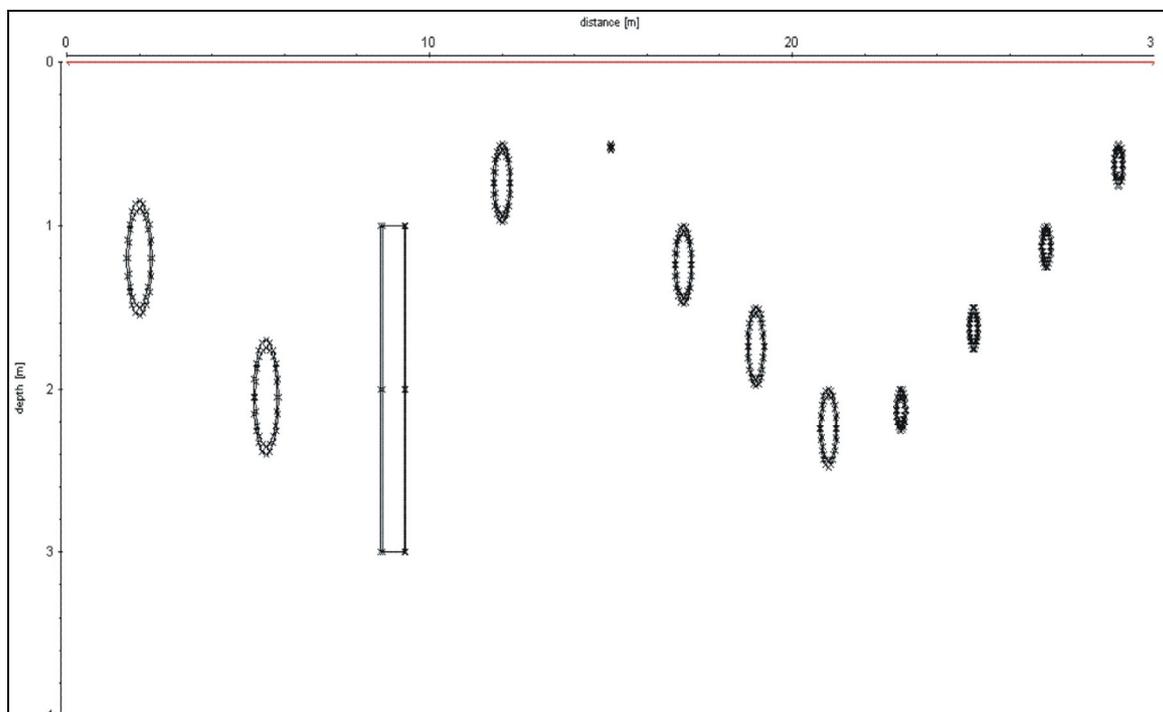


Figura 4.10 – Modelo de entrada dos alvos para a simulação numérica da linha de manilhas de concreto.

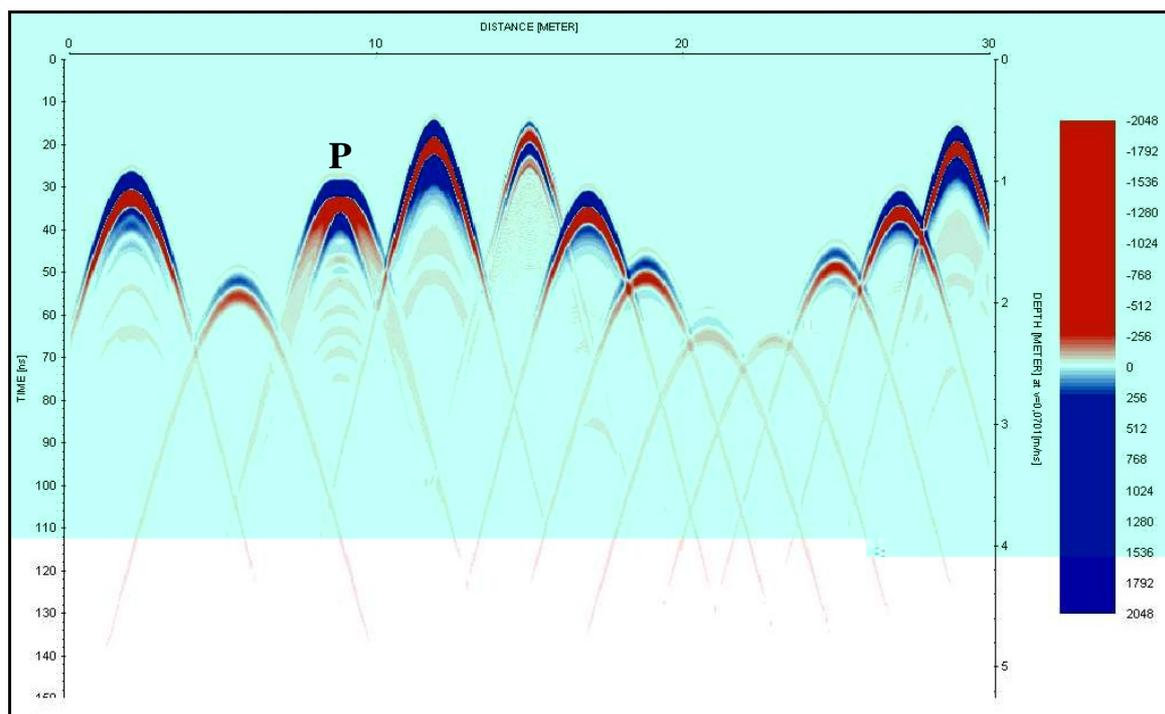


Figura 4.11 - Modelagem com arranjo de antenas Ey-Ey, espaçamento entre traços de 0,01m e frequência de 100 MHz.

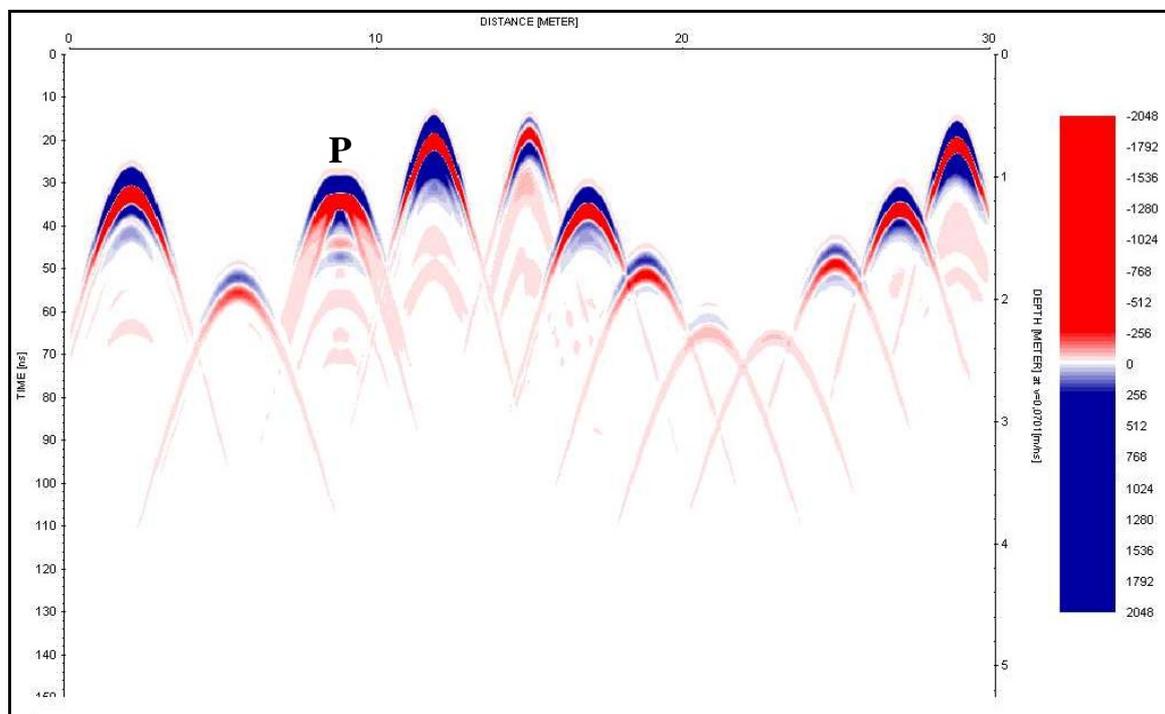


Figura 4.12 - Modelagem com arranjo de antenas Ex-Ex, espaçamento entre traços de 0,01m e frequência de 100 MHz.

Como pode ser notado nas duas modelagens, todas as manilhas de concreto foram detectadas. Embora, as modelagens tenham sido feitas com arranjos de antenas diferentes, os resultados visuais foram praticamente os mesmos, sendo que, a única diferença está associada à identificação da base da manilha P, a qual, está disposta verticalmente. Para esse alvo, o resultado da modelagem Figura 4.12 é melhor do que a modelagem Figura 4.11, ou seja, apresenta maior resolução desta.

As Figuras 4.13 e 4.14, se referem às modelagens realizadas com antenas de 200MHz, com arranjos de antenas Ey-Ey e Ex-Ex, respectivamente, utilizando os mesmos parâmetros das duas anteriores.

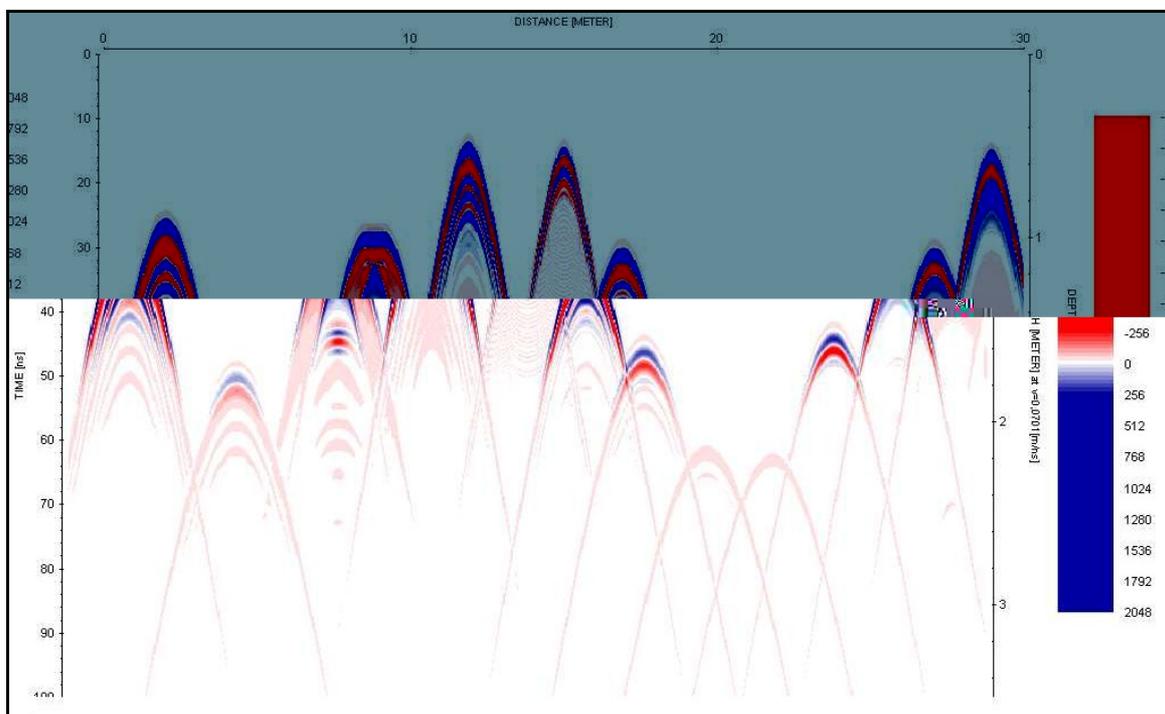


Figura 4.13 - Modelagem com arranjo de antenas Ey-Ey, espaçamento entre traços de 0,01m e frequência de 200 MHz.

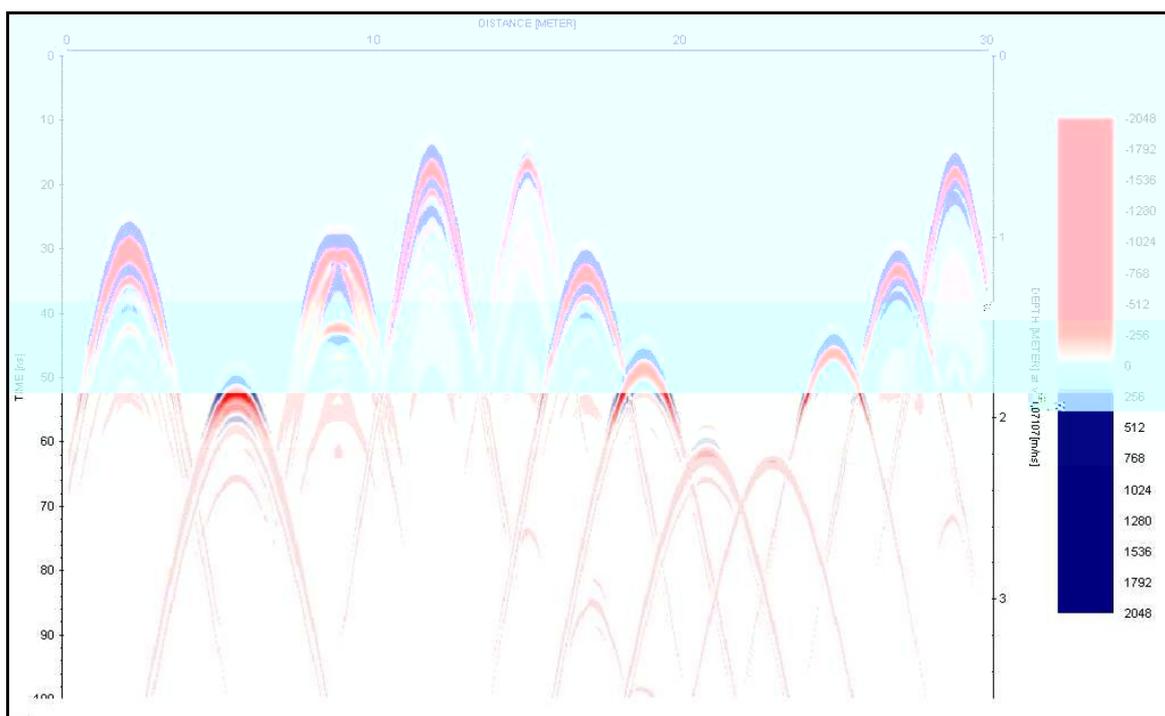


Figura 4.14 - Modelagem com arranjo de antenas Ex-Ex, espaçamento entre traços de 0,01m e frequência de 200 MHz.

As modelagens feitas com frequência de 200MHz obtiveram resultados bastante semelhantes entre si. Mas, quando comparadas às realizadas com 100MHz observa-se uma perda de nitidez para os alvos mais profundos. Isso é explicado devido à intensidade de atenuação da onda eletromagnética no meio ser maior para frequências maiores.

Em aspectos gerais, nota-se em primeiro momento que a identificação dos alvos é altamente dependente da profundidade em que se encontram e isso é explicado pelo fato da atenuação da onda eletromagnética estar intimamente ligado à profundidade. Outra característica que se mostrou muito importante foi o espaçamento entre os traços, o qual definiu a resolução espacial dos alvos, determinando que para espaçamentos menores maior é a resolução espacial dos alvos, pois a imagem é formada com um maior número de traços por unidade de comprimento investigado.

Quanto aos arranjos de antenas empregados pouca diferença foi percebida para a linha de manilhas, com exceção do alvo P disposto verticalmente, no qual o arranjo Ex-Ex apresentou maior detalhamento da base da estrutura. Para os alvos da linha de tubos de pvc, o emprego dos arranjos foi decisivo, pois sem o emprego das duas componentes não seria possível fazer a diferenciação entre os tubos preenchidos por água, parcialmente preenchidos por água e os vazios.

Sendo assim, analisando todos os critérios de detecção dos alvos a configuração com arranjo Ex-Ex, frequência de 200MHz e espaçamento entre traços de 0,01m foi a mais eficiente para a identificação dos tubos de pvc e a configuração que apresentou melhor imageamento para a linha de manilhas de concreto foi o arranjo Ex-Ex com frequência de 100MHz e espaçamento entre traços igual a 0,01m.

CAPÍTULO 5

AQUISIÇÃO, PROCESSAMENTO E INTERPRETAÇÃO DOS DADOS

5.1. Aquisição dos dados

Nesta pesquisa, os dados GPR foram adquiridos visando obter a melhor imagem dos alvos estudados, considerando as características dos alvos, bem como a geologia da área onde estes estão enterrados. Para isso, foram adquiridos vários conjuntos de dados com diversos parâmetros, dentre estes, modos de aquisição passo a passo e contínuo, arranjo de antenas Ey-Ey e Ex-Ex, frequências de operação de 100MHz e 200MHz, stack (empilhamento de traços) e espaçamento entre traços.

No modo passo a passo foram adquiridos 64 perfis de reflexão GPR com offset constante, sobre as duas linhas de estudos, sendo que metade foi adquirida com frequência de 100 MHz, visando obter uma boa profundidade de investigação e a outra metade com antena de 200 MHz, para proporcionar uma melhor resolução dos alvos. Os arranjos de antenas utilizados foram, Ey-Ey e Ex-Ex, os quais podem ser vistos na Figura 3.8 e na Figura 5.1, correspondente a aquisição em campo, sendo que o espaçamento entre traços utilizado foi de 0,2m. Visando aumentar a razão sinal/ruído dos traços foram aplicados diversos valores de stacks, i.e., empilhamentos, 4, 8, 16, 32, 64, 128, 256 e 512. (VERSTEEG, 1996).

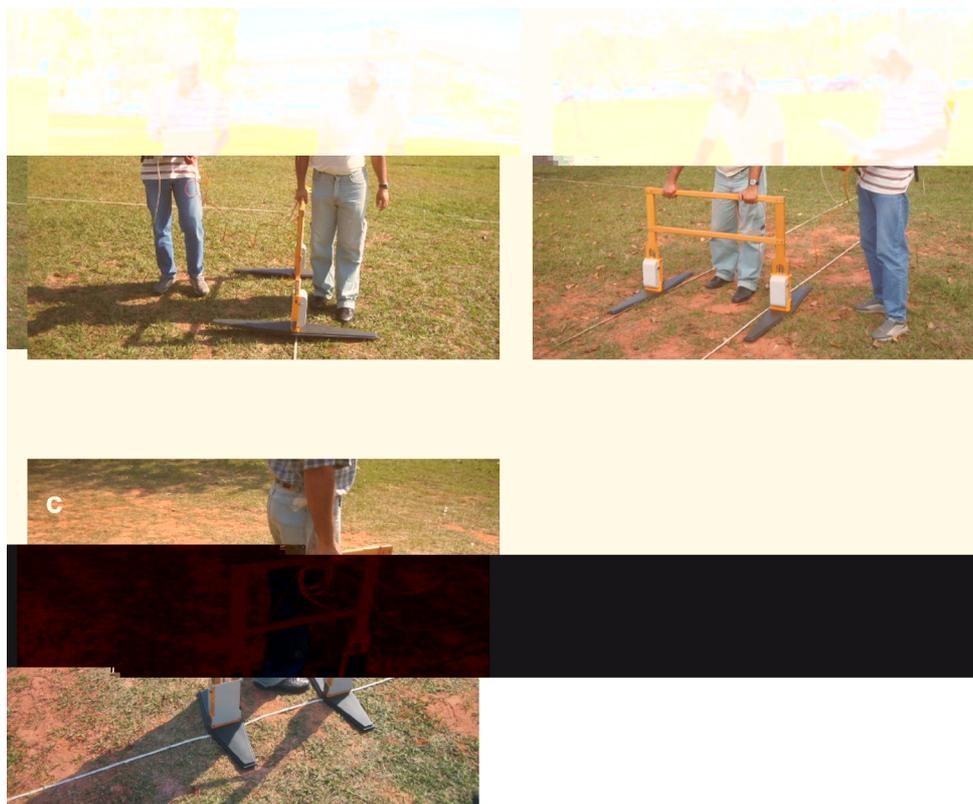


Figura 5.1 – Aquisições de campo passo a passo. a) arranjo Ey-Ey com antena de 100MHz, b) arranjo Ex-Ex com antena de 100MHz e c) arranjo Ey-Ey com antena de 200MHz.

Além do modo passo a passo de aquisição, o qual consiste em deslocar manualmente o conjunto de antenas, transmissora e receptora, também foram adquiridos dados no modo de aquisição “contínuo” (Figura 5.2), o qual proporciona aquisições com maior agilidade. Essa aquisição foi realizada com o acoplamento das antenas transmissora e receptora nas frequências de 100MHz e 200MHz no arranjo Ey-Ey, sobre um sistema de reboque, denominado, “trenó”, desenvolvido no departamento de geofísica, o qual pode ser puxado de maneira contínua. Para isso, foi necessário utilizar baixos valores de empilhamentos, pois, para que o “trenó” saísse de uma posição de medida para outra era necessário que cada um dos traços fossem corretamente empilhados. Portanto, foram utilizados os stacks, 4, 8, 16 e 32. Visando o aumento da resolução espacial dos alvos, foram aplicados diferentes valores de espaçamentos entre traços, como, 0,2m, 0,1m e 0,05m.

Estas variações nos espaçamento entre traços só foram possíveis nas aquisições contínuas, pois estas são realizadas em função da distância, onde um odômetro acoplado ao sistema registrava a distância percorrida e quando esta era igual ao espaçamento entre traços previamente ajustado, uma determinada quantidade de pulsos era disparada e empilhada. Para este modo foram adquiridos, 48 perfis, sendo, 24 sobre a linha de tubos de pvc e 24 sobre a linha de manilhas de concreto.



Figura 5.2 – Aquisições de campo no modo contínuo, a) arranjo Ey-Ey com antena de 100MHz, b) arranjo Ey-Ey com antena de 200MHz

5.2. Processamento dos dados

Os dados apresentados foram processados, através dos softwares *Gradix* e *Radan* e as principais etapas utilizadas nos processamentos dos dados foram:

Correção do drift. O drift do equipamento é causado por instabilidades do sistema, tais como, aquecimento e oscilações de carga da bateria, causando, deslocamentos verticais nos dados.

Ajuste da onda aérea para o tempo zero. Após os dados estarem livres de drifts é necessário corrigir a posição da onda aérea para o tempo zero. Fazer isso significa que a onda aérea terá como marco inicial o valor de tempo igual a zero, o qual corresponde à superfície

onde as antenas são colocadas. Dessa maneira, todos os alvos e estruturas identificados em subsuperfície terão seus valores de tempo duplo corretamente ajustados.

Também foram utilizadas filtragens do tipo temporal passa banda para retirar ruídos que estejam fora do espectro gaussiano. Os parâmetros para corte de frequências foram determinados, através da visualização dos espectros de amplitude dos traços que compõem o perfil GPR. Após, os dados serem filtrados foram aplicados ganhos no tempo (linear, constante, esférico e exponencial), os quais servem para compensar as perdas por atenuação e espalhamento esférico do sinal.

Com exceção da correção do drift, todas as outras etapas usadas no processamento foram realizadas usando o software Radan. Após, os processamentos de sinais serem executados, foram realizadas as conversões dos perfis passando da escala de tempo para a escala de profundidade. A conversão foi realizada, através, do seguinte procedimento:

Foi determinada a velocidade para cada um dos refletores presentes nos radargramas, através da relação, $v = 2h/t$, onde t é o tempo duplo mostrado no radargrama, o qual corresponde ao topo da reflexão e h é a posição real do alvo instalado no SCGR. Após, a velocidade ser determinada foi, então, determinado um valor de permissividade dielétrica (ϵ) médio, através da relação $\epsilon = (c/v)^2$, ou seja, para cada topo de reflexão foi determinado um valor para ϵ e, assim, foi calculado um valor médio com esses valores. Esse é um passo importante, pois é através do valor de permissividade dielétrica que as reflexões são colocadas nas profundidades mais próximas das reais.

Assim, para os dados de tubos de pvc e manilhas de concreto, foram encontrados os seguintes valores para, comprimentos de onda, permissividades dielétricas e velocidade para as duas linhas de estudos, os quais são apresentados na Tabela 5.1. Tais valores são aqui apresentados, pois farão parte da análise comparativa durante as discussões dos resultados.

Tabela 5.1 – Valores médios de permissividade dielétrica (ϵ), comprimento de onda (λ) e velocidade (m/ns).

Linhas estudadas	Tubos de pvc			Manilhas de concreto		
	Frequências(MHz)	ϵ	λ (m)	v(m/ns)	ϵ	λ (m)
100	18	0,35	0,07	18	0,70	0,07
200	18	0,35	0,07	18	0,35	0,07

Os resultados a seguir foram processados utilizando uma ferramenta conhecida como “macro”, disponível no software Radan, a qual, consiste em inserir e gravar os parâmetros de processamento para aplicá-los automaticamente sobre os perfis que o usuário desejar. Para esta pesquisa, a “macro” foi utilizada em aquisições realizadas sobre a mesma linha de estudo com diferentes modos de aquisição, arranjos de antenas, frequência e diferentes stacks. Essa foi a maneira mais coerente encontrada para estabelecer as comparações entre os efeitos dos diversos valores de empilhamentos empregados durante o estudo de uma determinada linha.

5.3. Interpretação dos resultados

5.3.1- Linha de manilhas de concreto

Nos perfis apresentados a seguir foram utilizados os parâmetros, modo de aquisição passo a passo, arranjo de antenas Ey-Ey, frequência de 100MHz e espaçamento entre traços de 0,2m, sendo que, a Figura 5.3 mostra os perfis GPR sobre a linha de manilhas de concreto com stacks variando de 4 à 32 e a Figura 5.4 mostra as aquisições realizadas com stacks variando de 64 à 512.

Como pode ser notado, há uma razoável diferença entre a qualidade dos perfis mostrados nas Figuras 5.3a e 5.3b. A imagem da Figura 5.3a, correspondente à aquisição com

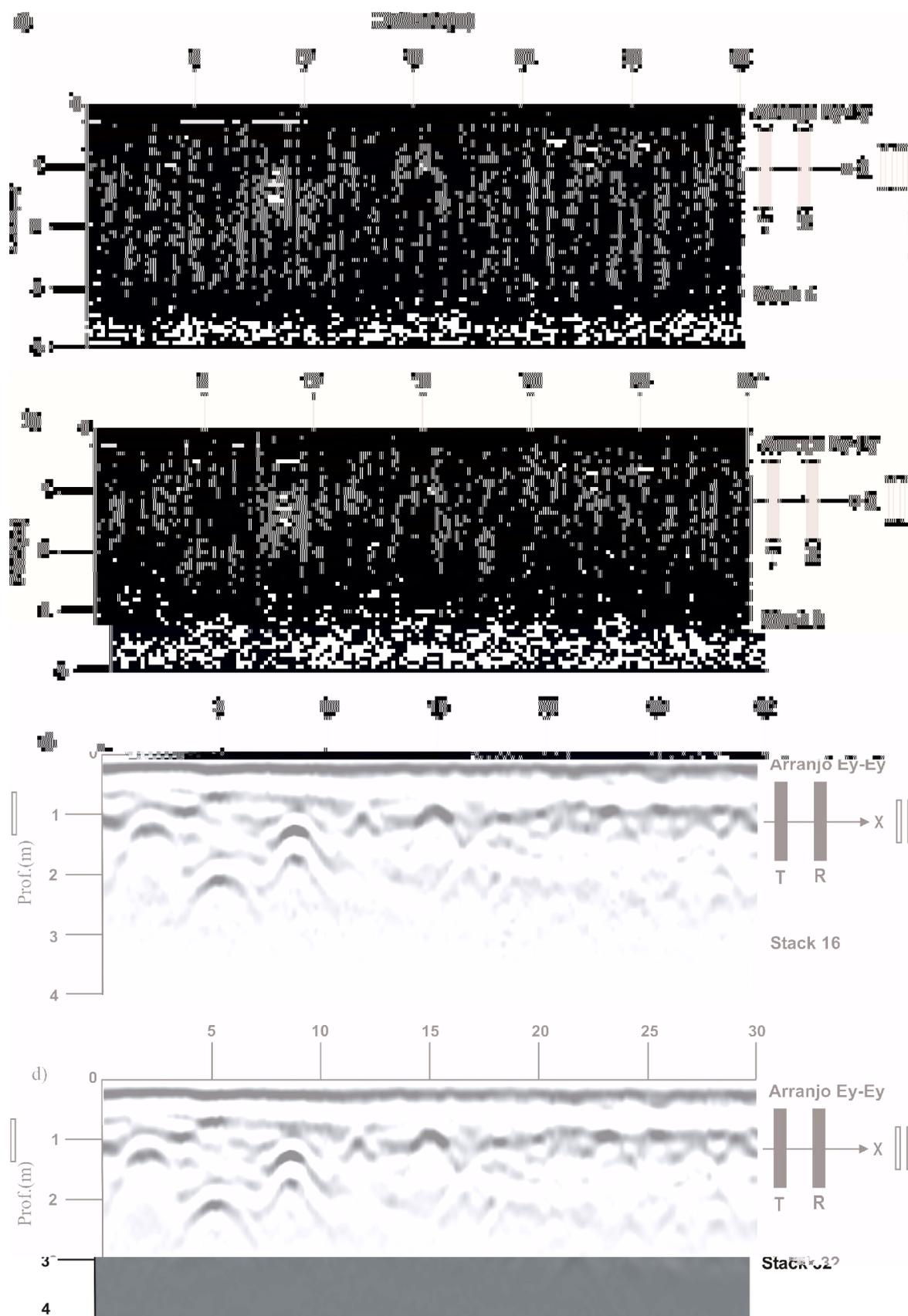


Figura 5.3 – Aquisições realizadas no modo passo a passo, arranjo Ey-Ey, frequência de 100MHz e espaçamento entre traços de 0,2m. a) stack 4, b) stack 8, c) stack 16 e d) stack 32.

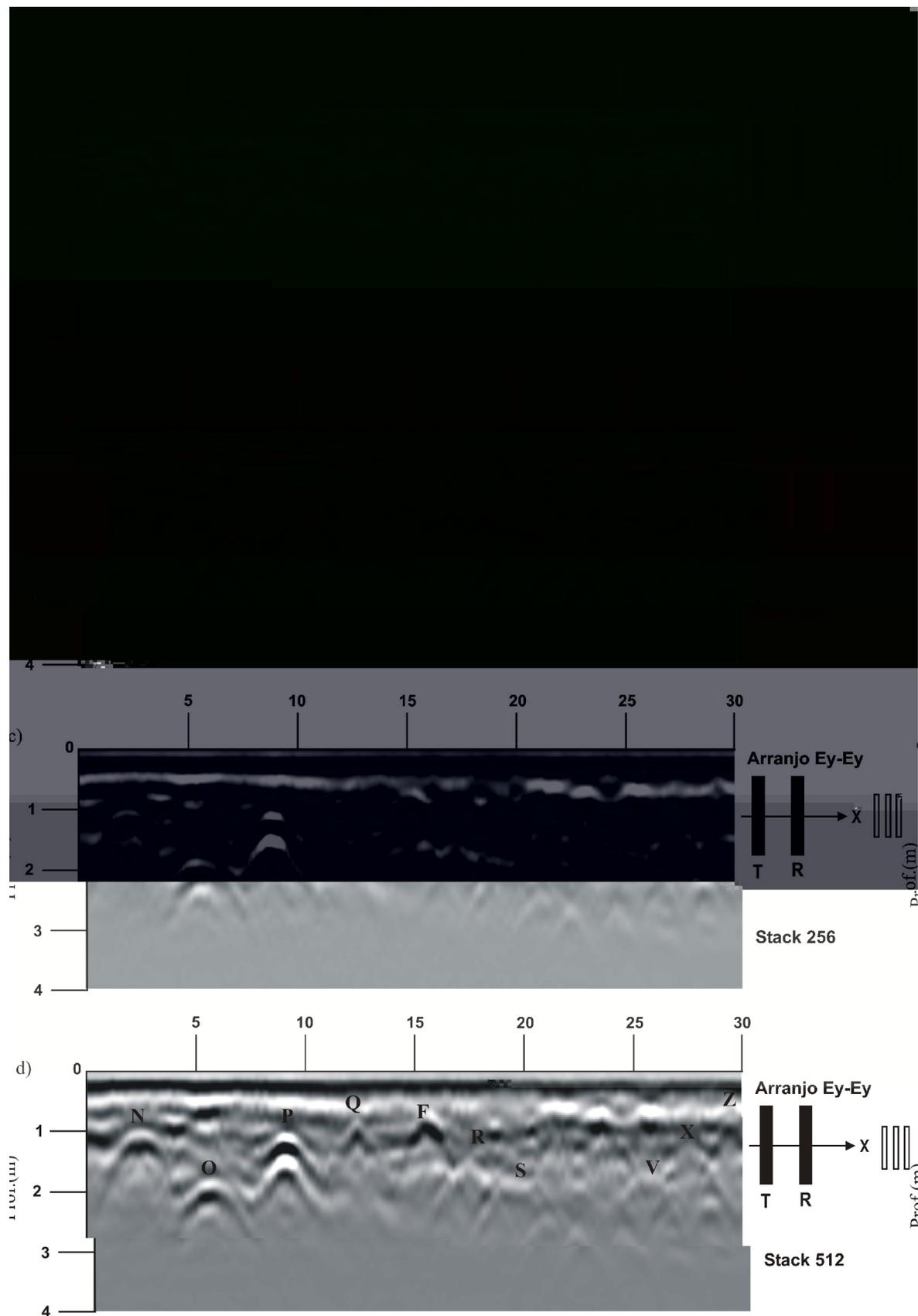


Figura 5.4 – Aquisições realizadas no modo passo a passo, arranjo Ey-Ey, frequência de 100MHz e espaçamento entre traços de 0,2m. a) stack 64, b) stack 128, c) stack 256 e d) stack 512.

stack 4, apresenta uma seção mais ruidosa, principalmente, quando a análise visual é feita nas partes mais profundas da seção GPR. A presença desse ruído nas partes mais profundas, combinado, aos pequenos diâmetros das estruturas localizadas nessas posições, e à atenuação natural da onda eletromagnética, a qual, é dependente da profundidade, consistem em fatores que reduzem drasticamente a capacidade de detecção das estruturas estudadas, que se localizam nessas profundidades.

Por outro lado, a Figura 5.3b, adquirida com stack 8, não apresenta os mesmos ruídos presentes na parte mais profunda do perfil da Figura 5.3a. Isso se deve, principalmente pelo aumento do stack (empilhamento), o qual melhorou a razão sinal/ruído (VEERSTEG, 1996) e eliminou, assim, os ruídos aleatórios da parte mais profunda da seção GPR, possibilitando que, alvos mais profundos sejam identificados com mais nitidez. Apesar, do empilhamento ser uma técnica que visa aumentar a razão sinal/ruído, melhorando, assim, a qualidade da imagem, nenhuma melhoria significativa na definição dos refletores foi observada nas seções GPR com stacks maiores que 8.

A seguir, são apresentadas as seções adquiridas no modo contínuo, com frequência de 100MHz, stacks variando de 4 à 32 e espaçamento entre traços iguais a 0,2m, 0,1m e 0,05m. Para estas seções foram feitas comparações entre os perfis adquiridos com os mesmos espaçamentos entre traços e diferentes empilhamentos, visando, estabelecer a influência do aumento do empilhamento na qualidade da imagem. Além disso, também foram feitas comparações entre as aquisições realizadas com os mesmos empilhamentos, mas com espaçamentos entre traços diferentes, visando estabelecer a influência da variação dos espaçamentos entre traços realizada na aquisição dos dados. Por último são apresentadas as comparações entre as seções adquiridas nos modos, passo a passo e contínuo para frequências de 100MHz e arranjos de antenas Ey-Ey. Assim, são apresentados os radargramas reais adquiridos sobre as manilhas de concreto com o modo contínuo, arranjo de antenas Ey-Ey,

freqüência de 100MHz e empilhamentos variando de 4 à 32, onde a Figura 5.5 mostra o perfil com espaçamento entre traços de 0,2m, a Figura 5.6 mostra o perfil com o espaçamento de 0,1m e a Figura 5.7 mostra o perfil com o espaçamento de 0,05m.

Através, de uma análise visual e comparativa entre cada seção GPR, compreendida, em uma mesma família de radargramas que contém seções de diferentes stacks e mesmos espaçamentos entre traços, como é o caso das seções contidas nas Figuras 5.5, 5.6 e 5.7, nota-se que as imagens que possuem valores maiores de empilhamentos apresentam maior nitidez em toda seção, principalmente, ao longo da profundidade. Isto constitui em um fator importante, pois, pode-se concluir que com o aumento do empilhamento, as manilhas localizadas em maiores profundidades possuem maiores chances de serem identificadas.

Comparando-se as seções adquiridas com empilhamentos iguais e diferentes espaçamentos entre traços, pode-se concluir que para os alvos que possuem grandes diâmetros (70cm e 48cm) não houve alterações significativas, no entanto, houve considerável melhora no delineamento e definição dos refletores de alguns alvos pequenos e superficiais, correspondentes à manilha com 26cm de diâmetro, localizada na posição 29m e ao tubo metálico guia, localizado em 15m.

Por fim, comparando-se os dados adquiridos nos modos passo a passo e contínuo, com freqüências de 100MHz, nota-se que os padrões dos refletores são bem semelhantes. Todos os alvos que foram detectados em um modo, também foram detectados no outro e, devido a isso, mais aquisições foram realizadas. Pode-se dizer, que para ambos os modos, passo a passo e contínuo, com arranjos de antenas Ey-Ey e freqüência de 100MHz foram visualizados o mesmo conjunto de refletores, os quais corresponderam às manilhas, N, O, P, Q, F, R, S, V, X, Z, além de dois buracos vazios localizados nas posições de 23m e 25m, os quais foram identificados no radargrama e confirmados, através de furos de sondagens à trado. Todos os alvos que possuem maiores diâmetros, como as manilhas, N, O e P, foram bem imageados,

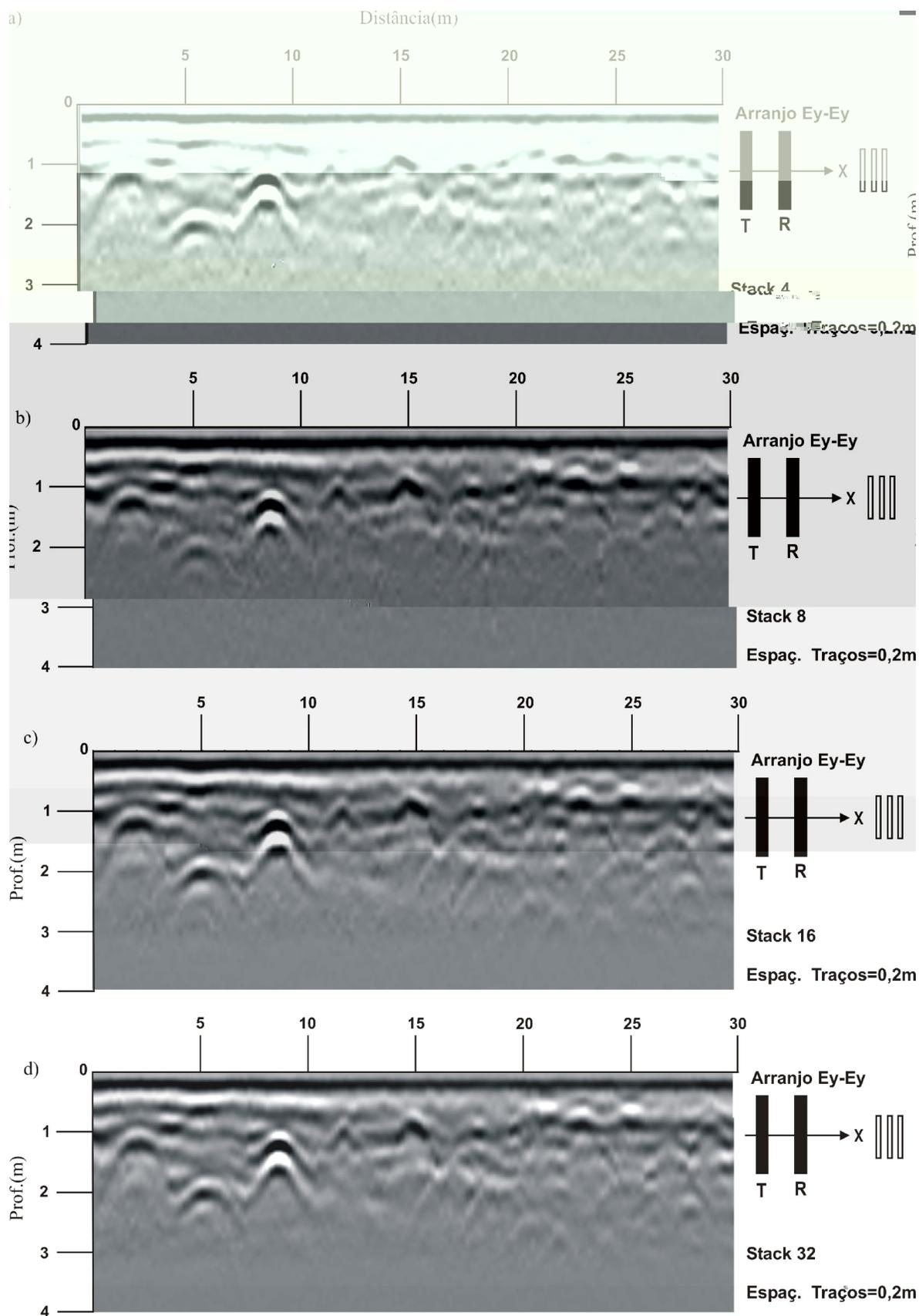


Figura 5.5 – Aquisições realizadas no modo contínuo, arranjo Ey-Ey, frequência de 100MHz e espaçamento entre traços igual a 0,2m. a) stack 4, b) stack 8, c) stack 16 e d) stack 32.

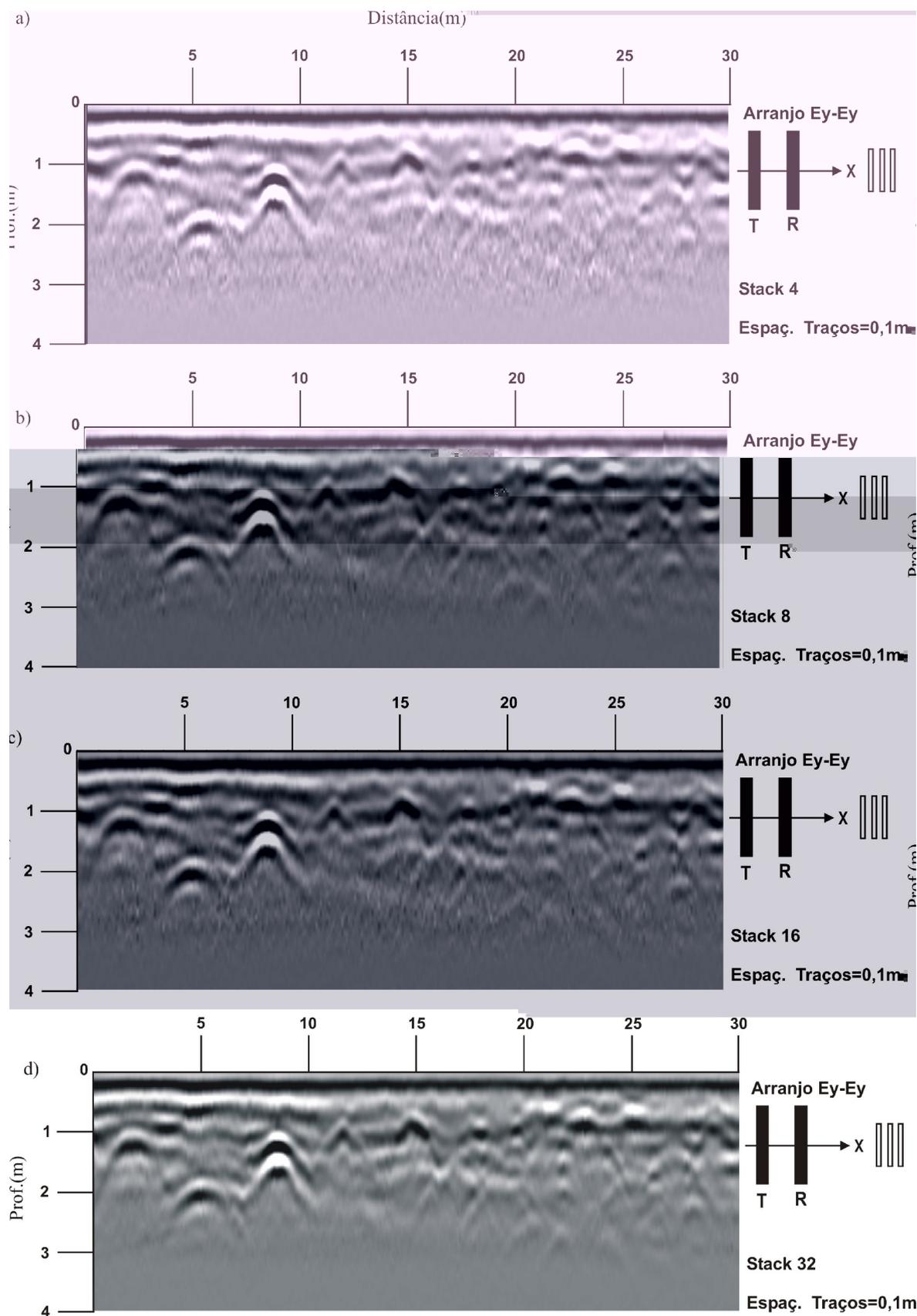


Figura 5.6 – Aquisições realizadas no modo contínuo, arranjo Ey-Ey, frequência de 100MHz e espaçamento entre traços igual a 0,1m. a) Stack 4, b) Stack 8, c) Stack 16 e d) Stack 32.

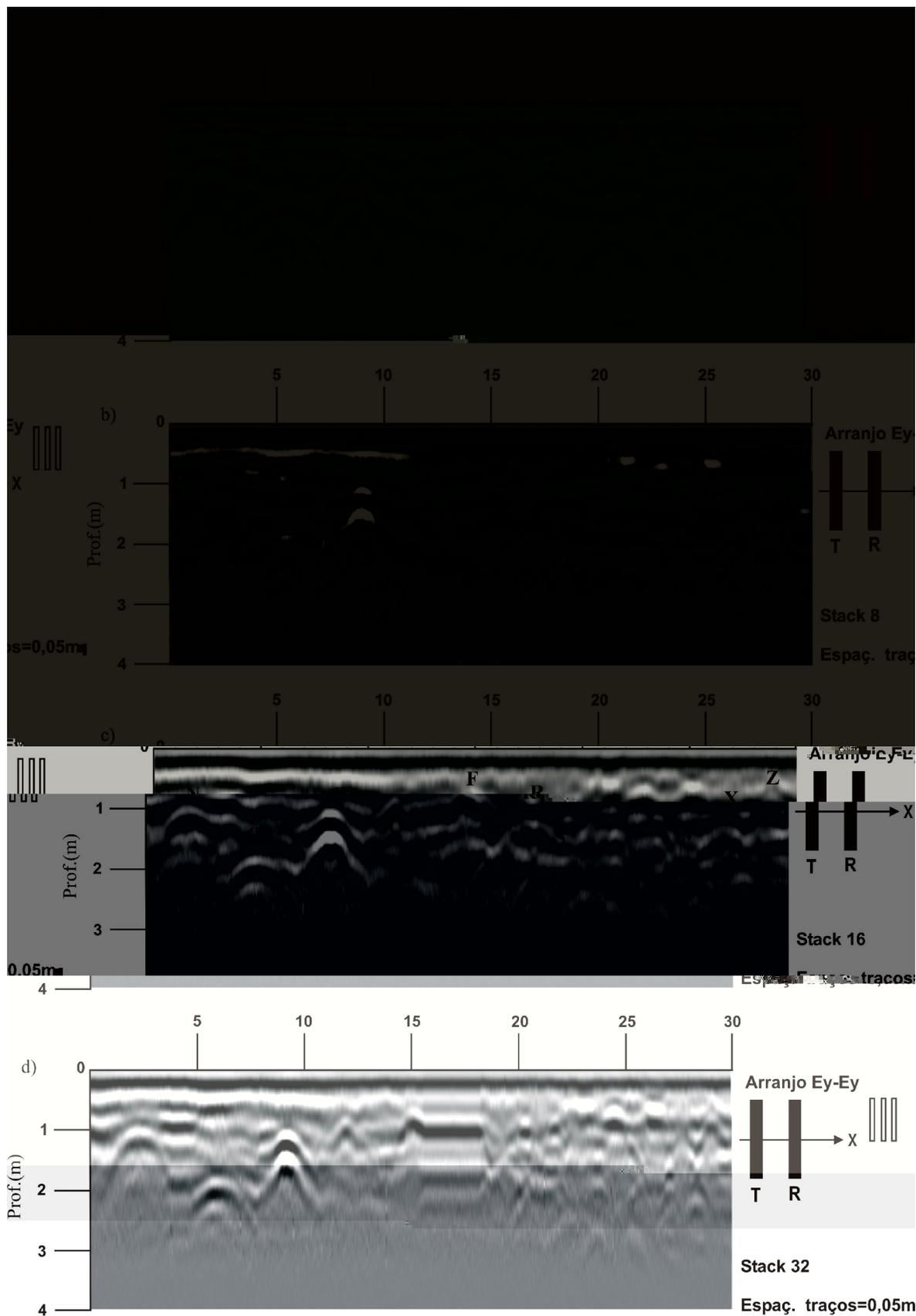


Figura 5.7 - Aquisições realizadas no modo contínuo, arranjo Ey-Ey, frequência de 100MHz e espaçamento entre traços igual a 0,05m. a) Stack 4, b) Stack 8, c) Stack 16 e d) Stack 32.

sendo que à medida que, os diâmetros dos corpos diminuía e suas profundidades aumentavam, os padrões dos refletores também diminuía quando estes foram comparados aos padrões dos refletores correspondentes às manilhas de grande diâmetro, N, O e P.

No modo contínuo na Figura 5.7d, entre a posição 15,5m e 17m, houve o aparecimento de um refletor horizontal diferenciado dos demais, o qual, na realidade corresponde a um problema na aquisição, ocasionado, por uma saturação do sistema, provavelmente devido à variação de velocidade durante a aquisição, ou seja, a velocidade de reboque das antenas foi maior que a velocidade necessária para o que sistema precisa para empilhar e montar um traço de sinal GPR. Isto causa uma falsa amostragem espacial e deve ser evitado durante a aquisição dos dados.

Como pôde ser observado foram usados diferentes valores de empilhamentos e stacks para os modos, passo a passo e contínuo. No modo passo a passo, por exemplo, é possível a utilização de empilhamentos maiores do que no modo contínuo, o que permite melhorar a razão sinal/ruído e conseqüentemente, aumentar as chances de visualizar estruturas ou alvos mais profundos, no entanto, quando este parâmetro é muito elevado, torna-se impraticável realizar a aquisição neste modo, devido ao enorme tempo necessário à coleta dos dados.

No modo contínuo é de grande utilidade a diminuição nos espaçamentos entre os traços, o que permite aumentar a resolução espacial dos alvos em subsuperfície, principalmente os mais rasos, sendo assim, mais apropriado para a detecção de alvos de pequeno diâmetro. Por outro lado, neste modo não se pode utilizar os empilhamentos dos traços elevados, pois como o sistema é continuamente puxado com uma velocidade aproximadamente constante há necessidade de um determinado tempo para que a antena transmissora emita os pulsos e a antena receptora possa empilhá-los e gerar a imagem corretamente. Neste caso, os alvos mais profundos tornam-se mais difíceis de serem detectados devido à baixa razão sinal/ruído.

As seções apresentadas anteriormente, adquiridas com antenas de 100MHz, apresentaram boa profundidade de penetração e bom imageamento dos alvos grandes, entretanto, devido ao grande comprimento de onda de aproximadamente 0,7m, as estruturas de menores diâmetros não foram bem detalhadas. Sendo assim, na tentativa de detectá-las e de obter respostas melhoradas para os demais alvos foram realizadas aquisições com antenas de 200MHz, a qual proporciona maior resolução dos alvos, devido, ao menor comprimento de onda (aproximadamente igual a 0,35m) gerado por essa antena. Dessa maneira, são mostradas na seqüência as aquisições realizadas com antenas de 200MHz usando os mesmos modos de aquisição, arranjo de antenas, espaçamento entre traços e empilhamentos, utilizados nas aquisições com 100MHz.

Assim, são apresentadas na Figura 5.8, as aquisições no modo passo a passo realizadas sobre a linha de manilhas de concreto com stacks variando de 4 a 32 e na Figura 5.9 são apresentados os dados correspondentes aos stacks de 64 a 512. Numa análise comparativa destas figuras, nota-se que os alvos N, O, Q, F e Z foram realçados devido ao aumento do stack que permitiu melhorar a razão sinal/ruído.

Também são notadas diferenças quanto à resolução dos refletores provenientes dos alvos mais rasos quando são comparados os padrões dos refletores provenientes das aquisições com ambas as frequências. Os refletores mais rasos são melhores visualizados com a frequência de 200MHz, independentemente de seus diâmetros, como pode ser observado, através dos refletores Q, F e Z, assim como, a maior resolução proveniente dos dois buracos localizados nas posições 23m e 25m. Apesar, da antena de 200MHz proporcionar maior resolução, os alvos mais profundos não foram visualizados, devido, principalmente, à atenuação da onda eletromagnética se dar de maneira mais intensa às ondas de altas frequências, devido ao menor comprimento de onda.

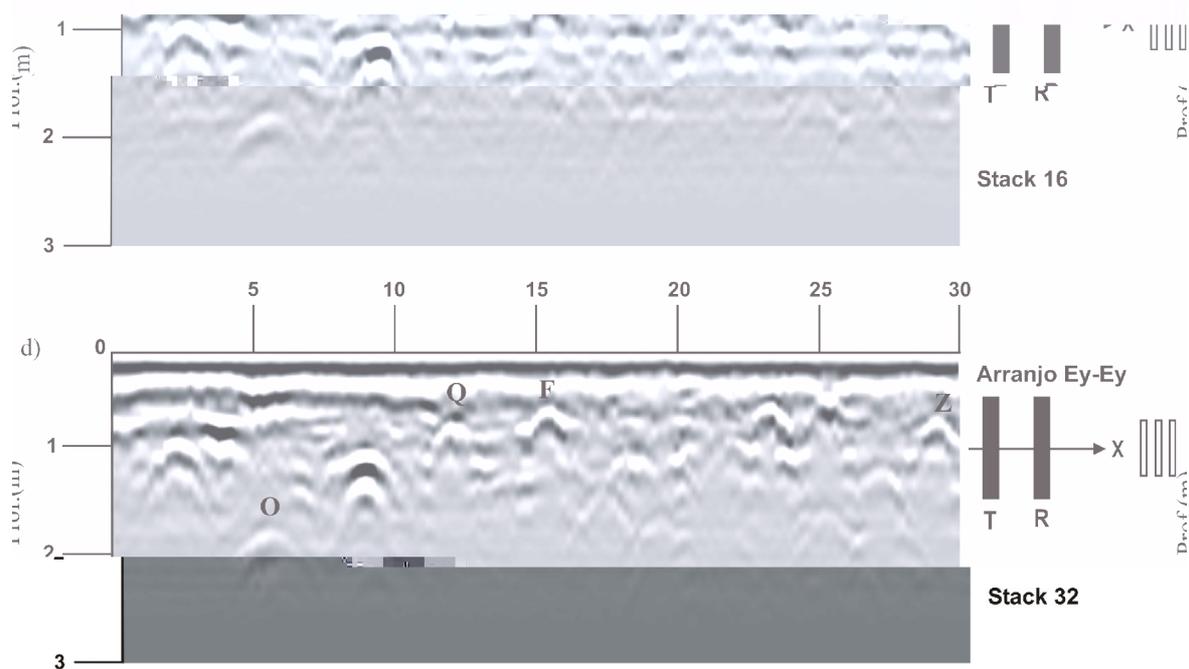


Figura 5.8 – Aquisições realizadas no modo passo a passo, arranjo Ey-Ey, frequência de 200MHz e espaçamento entre traços de 0,2m. a) stack 4, b) stack 8, c) stack 16 e d) stack 32.

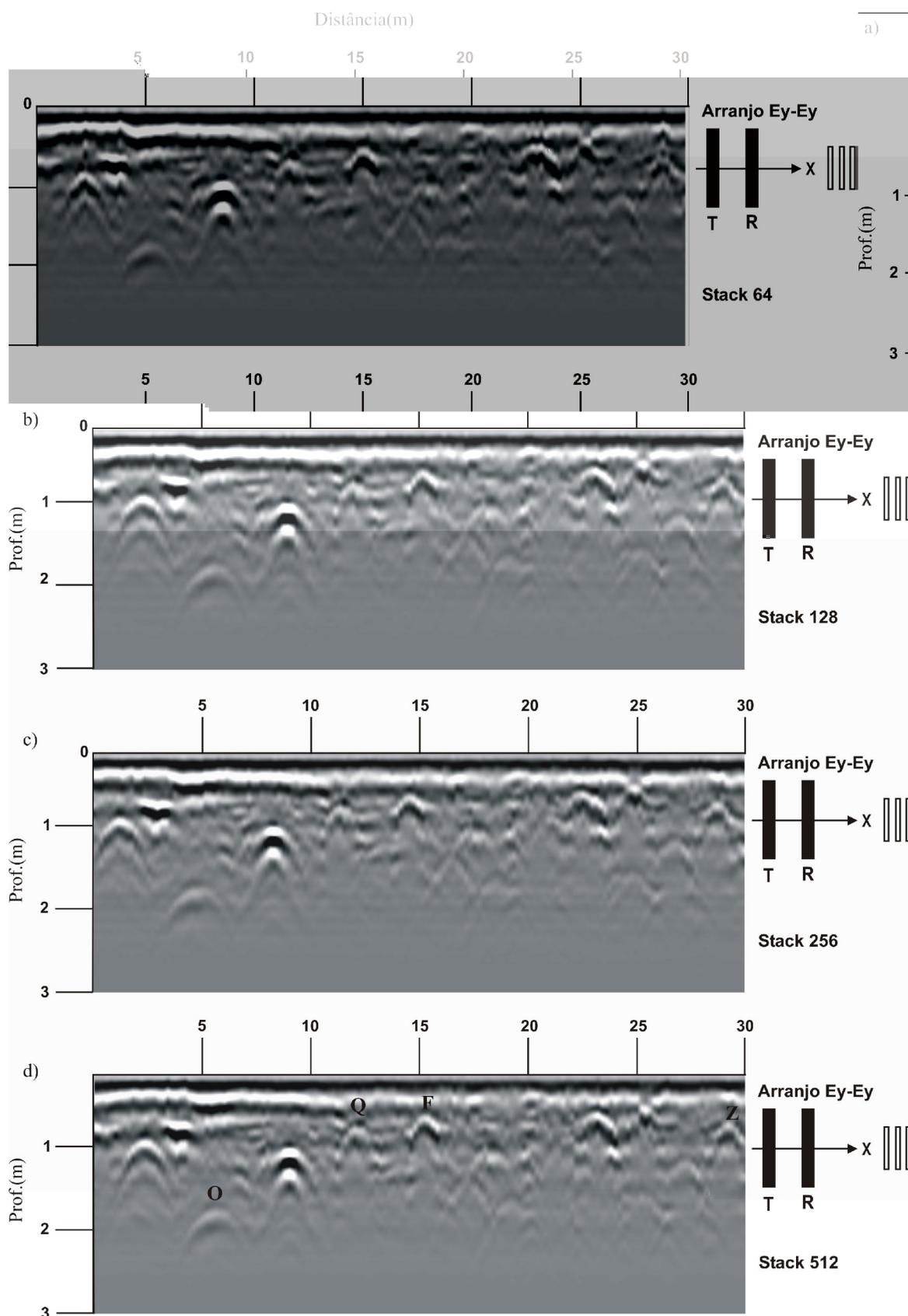


Figura 5.9 – Aquisições realizadas no modo passo a passo, arranjo Ey-Ey, frequência de 200MHz e espaçamento entre traços de 0,2m. a) stack 64, b) stack 128, c) stack 256 e d) stack 512.

A Figura 5.10 apresenta os resultados das aquisições realizadas com modo contínuo, arranjo de antenas Ey-Ey, frequência de 200MHz, stacks variando de 4 a 32 e espaçamento entre traços de 0,2m. As Figuras 5.11 e 5.12 foram adquiridas com esses mesmos parâmetros, diferenciando-se, pelo fato de utilizarem espaçamentos entre traços iguais a 0,1m e 0,05m, respectivamente. Comparando-se as seções GPR com diferentes empilhamentos e mesmos espaçamentos entre traços, nota-se que a melhora no padrão de reflexão dos alvos é sutil com o aumento do stack. Este fato também ocorre quando se compara as seções adquiridas com o mesmo empilhamento e diferentes espaçamentos entre traços. No entanto, as manilhas Q e Z apresentaram um aumento significativo na resolução espacial à medida que o espaçamento entre traços foi diminuído, ou seja, à medida que mais traços foram adquiridos por unidade de comprimento.

Através, da comparação das características dos refletores adquiridos pelos modos, passo a passo e contínuo, ambos, com frequência de 200MHz, percebe-se que foram detectados os mesmos alvos, sendo eles, N, O, P, Q, F, R, S, V, X e Z, além dos dois buracos localizados nas posições 23m e 25m, os quais se mostraram nos perfis contínuos como duas hipérbolas bem definidas.

As próximas figuras mostram os resultados dos perfis adquiridos sobre a linha de manilhas de concreto, utilizando-se os mesmos parâmetros discutidos anteriormente, porém os perfis foram adquiridos com o arranjo de antenas Ex-Ex. Estes perfis têm como objetivo avaliar a melhora na imagem dos alvos de subsuperfície baseado principalmente na polarização das antenas. Para tanto, foram realizadas aquisições de dados com o modo passo a passo, arranjo de antenas Ex-Ex, frequências de 100MHz e 200MHz, espaçamento entre traços de 0,2m e stacks variando de 4 a 512. Devido, aos problemas logísticos de acoplamento das antenas com o arranjo Ex-Ex no “trenó” usado para a aquisição no modo contínuo, tais dados não foram adquiridos e, portanto, não são apresentados nessa pesquisa.

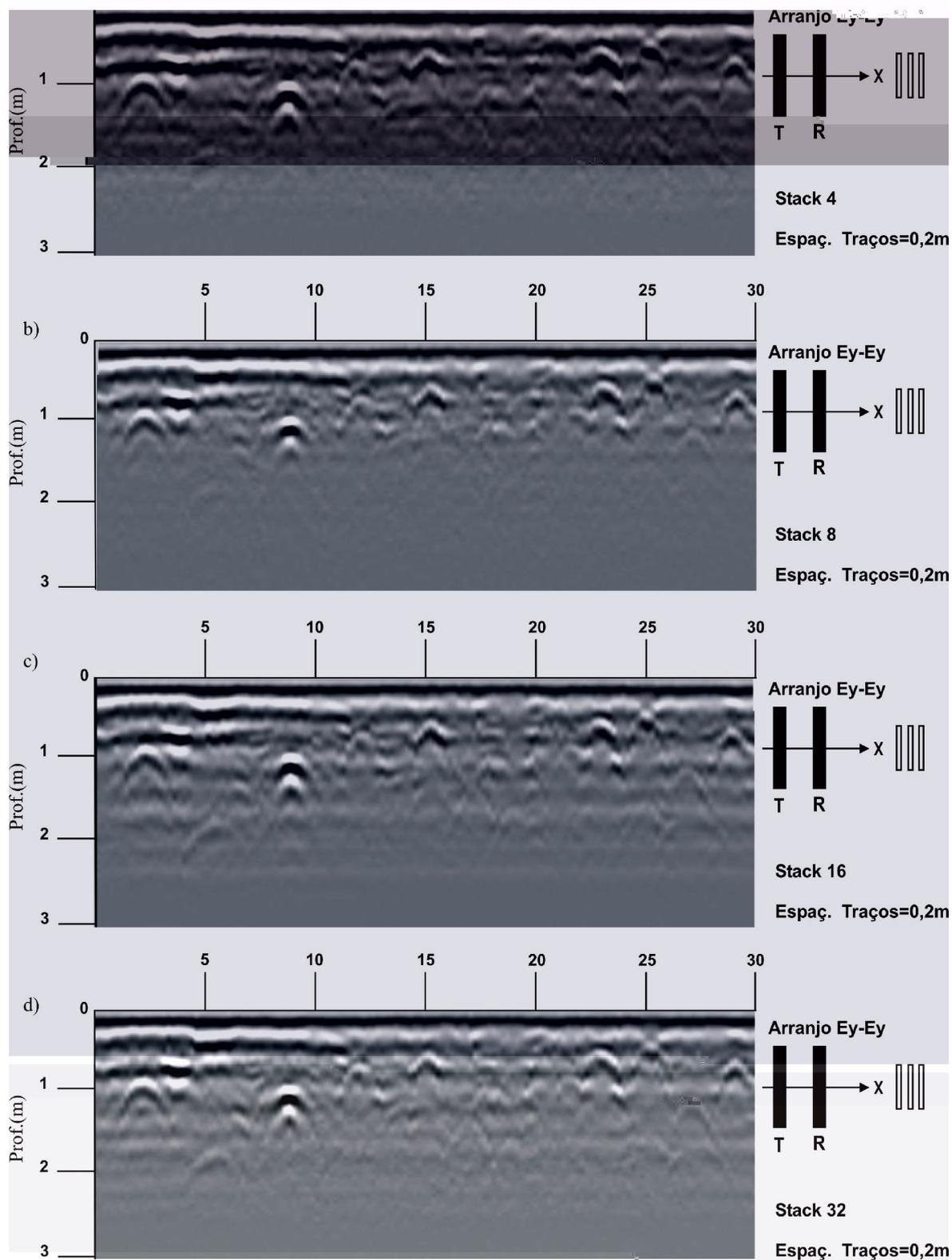


Figura 5.10 – Aquisições realizadas no modo contínuo, arranjo Ey-Ey, frequência de 200MHz e espaçamento entre traços igual a 0,2m. a) stack 4, b) stack 8, c) stack 16 e d) stack 32.

Figura 5.11 – Aquisições realizadas no modo contínuo, arranjo Ey-Ey, frequência de 200MHz e espaçamento entre traços igual a 0,1m. a) stack 4, b) stack 8, c) stack 16 e d) stack 32.

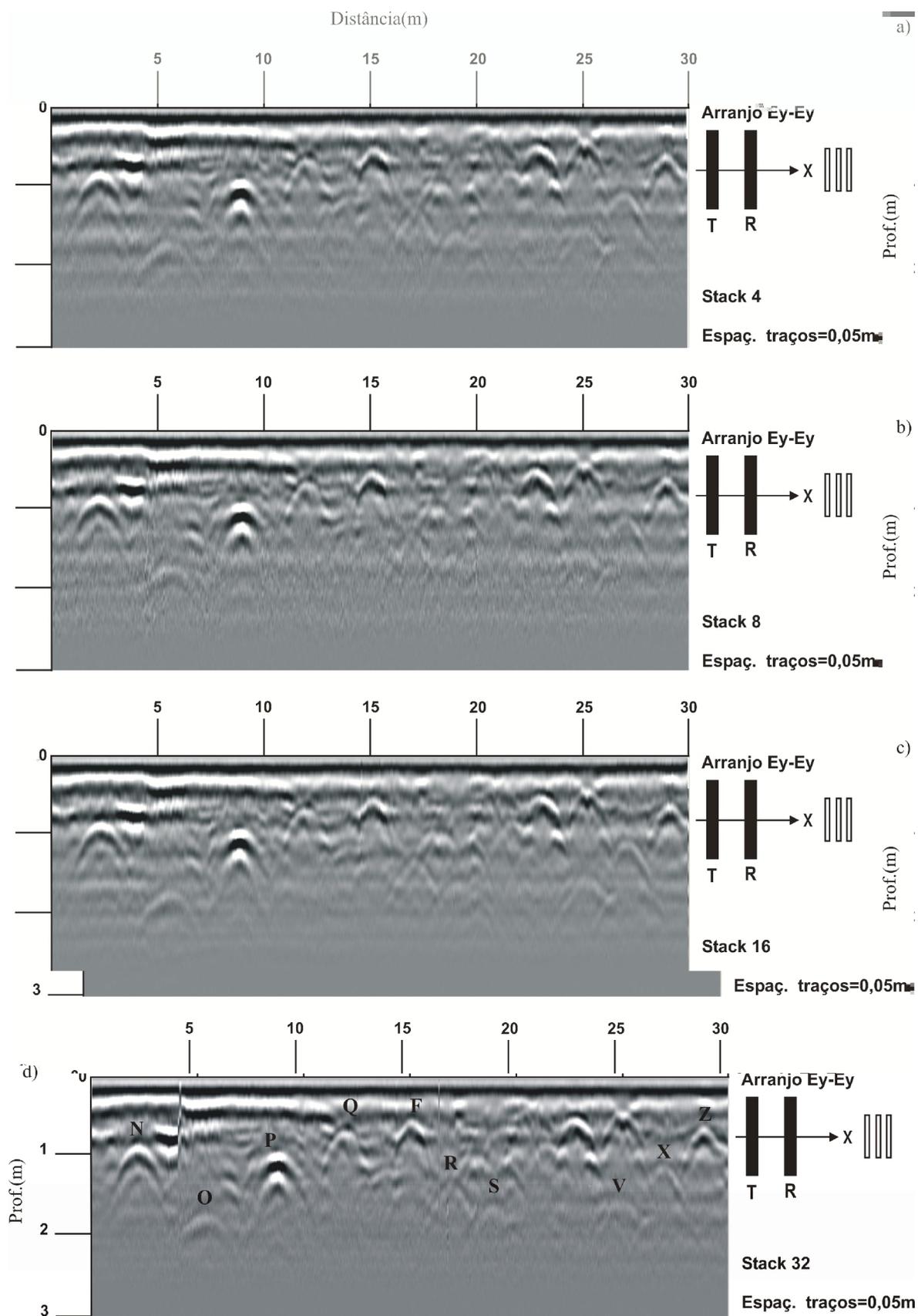


Figura 5.12 – Aquisições realizadas no modo contínuo, arranjo Ey-Ey, frequência de 200MHz e espaçamento entre traços igual a 0,05m. a) stack 4, b) stack 8, c) stack 16 e d) stack 32.

A Figura 5.13 mostra os dados adquiridos sobre a linha de manilhas de concreto no modo passo a passo, arranjo de antenas Ex-Ex, frequência de 100MHz, espaçamento entre traços de 0,2m e stacks variando de 4 a 32 e a Figura 5.14 mostra as aquisições realizadas com stacks de 64 a 512. A análise comparativa destes perfis permite destacar que, à medida que, o stack é aumentado, mais nítida torna-se a seção ao longo da profundidade, uma vez que, a razão sinal/ruído é aumentada sucessivamente, possibilitando maiores chances de detecção dos alvos mais profundos. Também é mostrado que todas as manilhas de concreto são detectadas com boas amplitudes, exceto, para os alvos T, U e V, os quais possuem pequenos diâmetros e estão localizados à 2m de profundidade. Apesar disso, na Figura 5.14d todos os alvos enterrados nesta linha são nitidamente identificados. Um refletor que merece destaque é a manilha vertical P, a qual apresenta um refletor que o aproxima de sua disposição real. Vale salientar também, que para essa aquisição o tubo metálico guia não foi visualizado em nenhum dos perfis. Isto provavelmente ocorreu, devido o grande espaçamento entre traços (0,2m), quando comparado com o diâmetro do cano metálico (0,04m) e devido ao fato do padrão de radiação do arranjo Ex-Ex possuir uma pegada lateral menor do que o arranjo Ey-Ey fazendo com que a zona cega do padrão de radiação (ANNAN, 1992) seja maior para objetos localizados em pequenas profundidades.

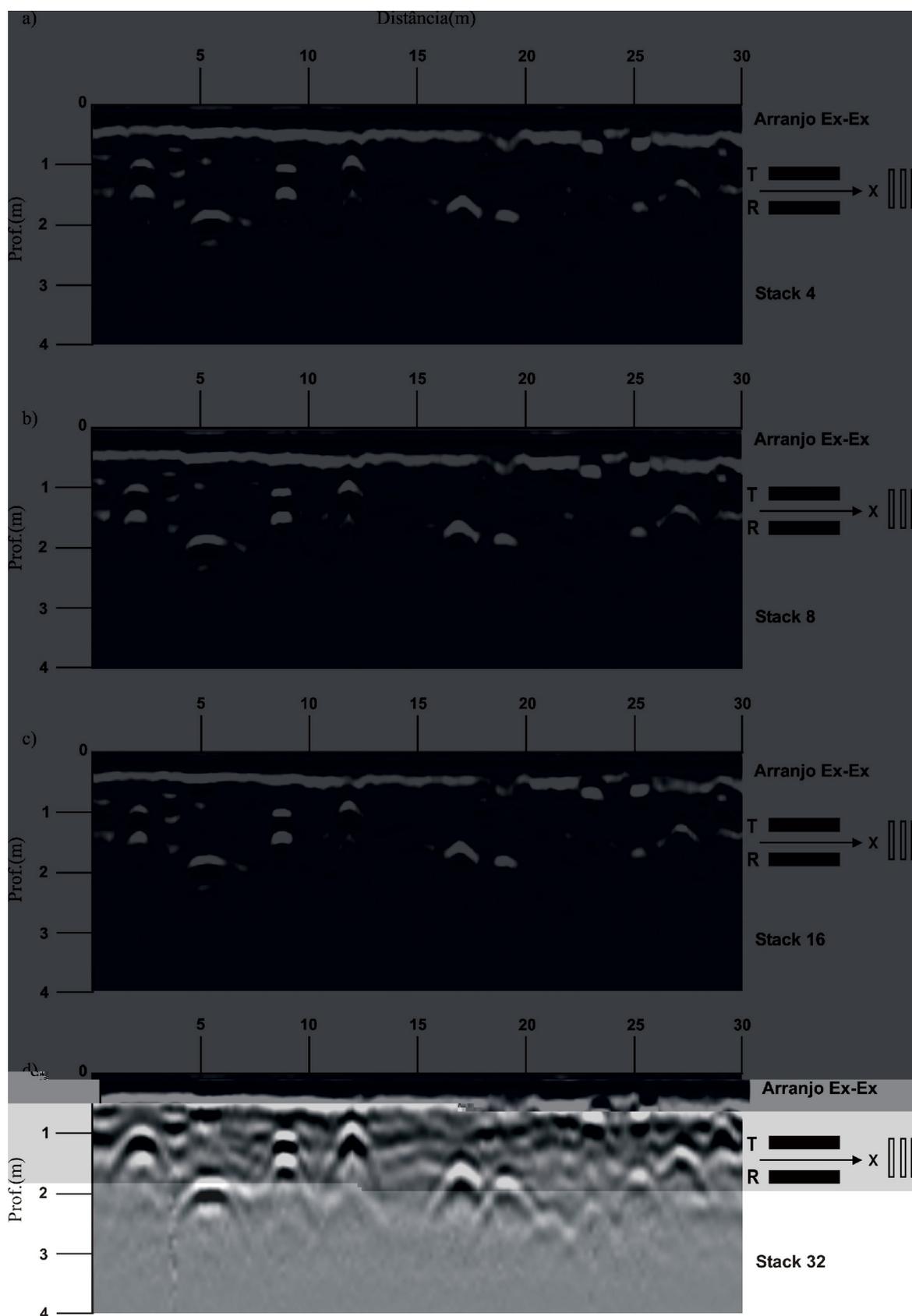


Figura 5.13 - Aquisições realizadas no modo passo a passo, arranjo Ex-Ex, frequência de 100MHz e espaçamento entre traços igual a 0,2m. a) stack 4, b) stack 8, c) stack 16 e d) stack 32.

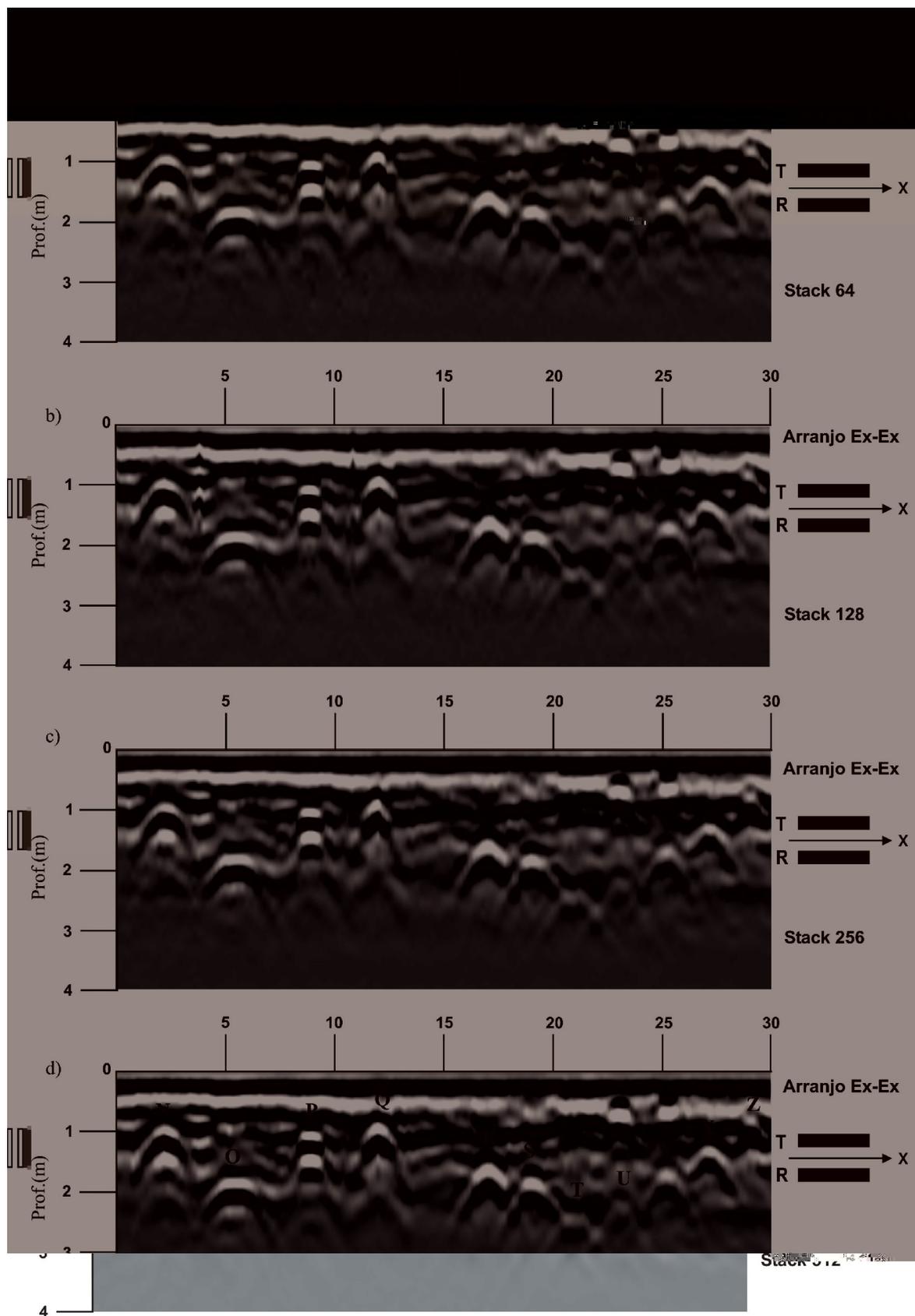


Figura 5.14 - Aquisições realizadas no modo passo a passo, arranjo Ex-Ex, frequência de 100MHz e espaçamento entre traços igual a 0,2m. a) stack 64, b) stack 128, c) stack 256 e d) stack 512.

A seguir, são apresentadas as figuras correspondentes às aquisições no modo Ex-Ex com frequência de antenas de 200MHz, utilizando os mesmos parâmetros usados na aquisição com antenas de 100MHz. A Figura 5.15 mostra os dados adquiridos sobre a linha de manilhas de concreto no modo passo a passo, arranjo de antenas Ex-Ex, frequência de 200MHz, espaçamento entre traços de 0,2m e stacks variando de 4 a 32 e a Figura 5.16 mostra os resultados das aquisições com stacks de 64 a 512. Com base na análise comparativa dos perfis pode-se afirmar que os alvos em subsuperfície foram detectados com nitidez quando comparados com o arranjo das antenas Ey-Ey. Nota-se claramente que os refletores tornam-se mais nítidos à medida que os stacks são aumentados. Por exemplo, com o aumento do stack de uma seção para outra algumas estruturas passaram a ser visualizadas, como são os casos das manilhas T e U, de pequenos diâmetros, que não são identificadas na Figura 5.15a, porém, passam a ser, como mostrado na Figura 5.16d. Isso ilustra a importância do uso do empilhamento na detecção de estruturas com pequenos diâmetros e localizadas em áreas relativamente profundas.

Devido, ao aumento da frequência de 100MHz para 200MHz o cano metálico guia (alvo F), que não foi identificado nas aquisições com frequência de 100MHz e arranjo de antenas Ex-Ex passa a ser identificado em todas as seções adquiridas com as antenas de 200 MHz, através de um refletor discreto localizado na posição 15m. Isto se tornou possível, devido, à diminuição do comprimento de onda de aproximadamente 0,7m para 0,35m, o qual permitiu maior detalhamento dessa estrutura, i.e., por meio do aumento da resolução vertical. Apesar, das aquisições dos perfis realizados com as antenas de 200MHz no modo Ex-Ex terem sido bem eficientes, os perfis adquiridos com as antenas de 100MHz permitiram detectar com mais nitidez os alvos em subsuperfície por apresentarem melhor capacidade de penetração.

Dessa maneira, pode-se dizer, que através da comparação entre todos os perfis

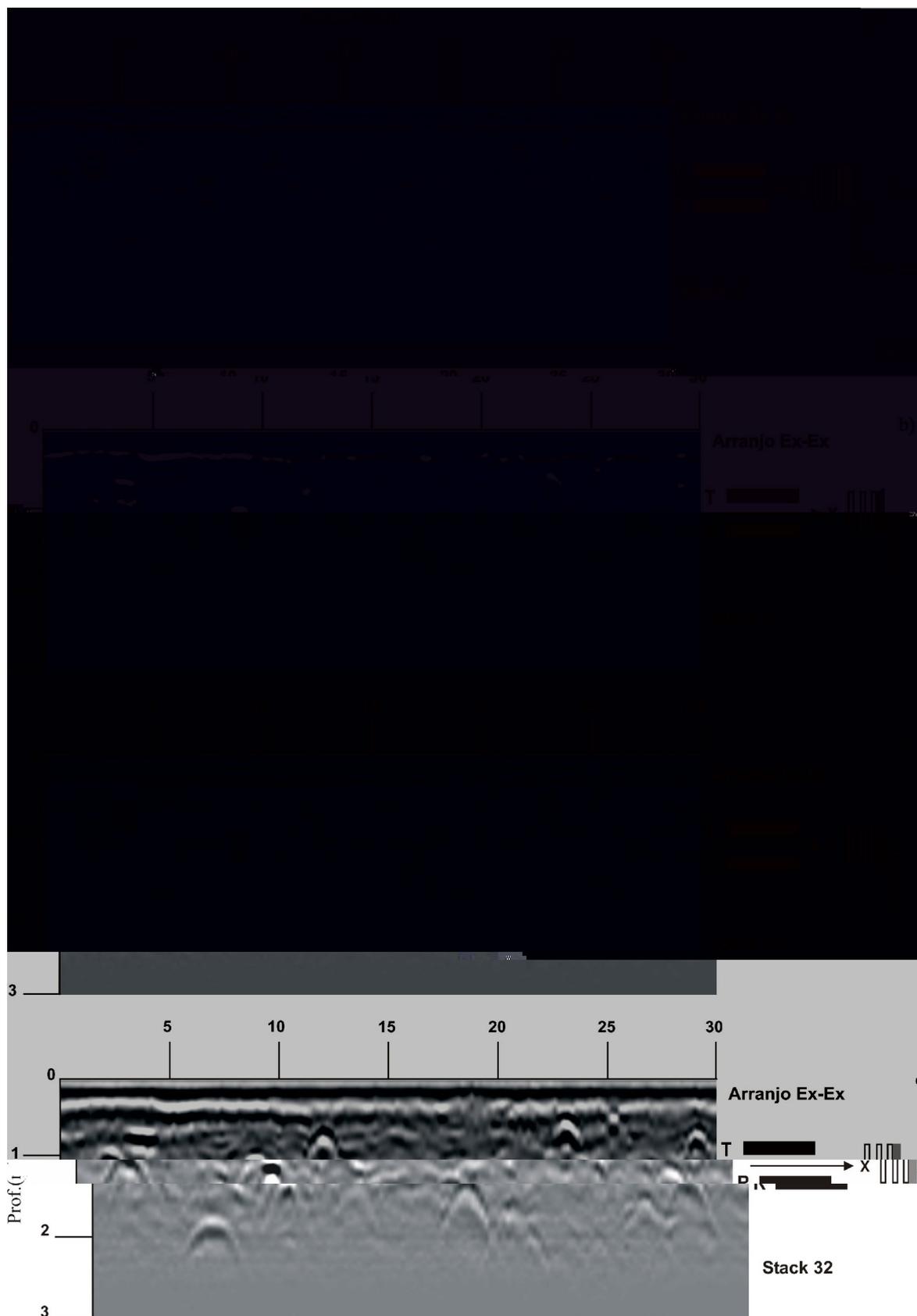


Figura 5.15 - Aquisições realizadas no modo passo a passo, arranjo Ex-Ex, frequência de 200MHz e espaçamento entre traços igual a 0,2m. a) stack 4, b) stack 8, c) stack 16 e d) stack 32.

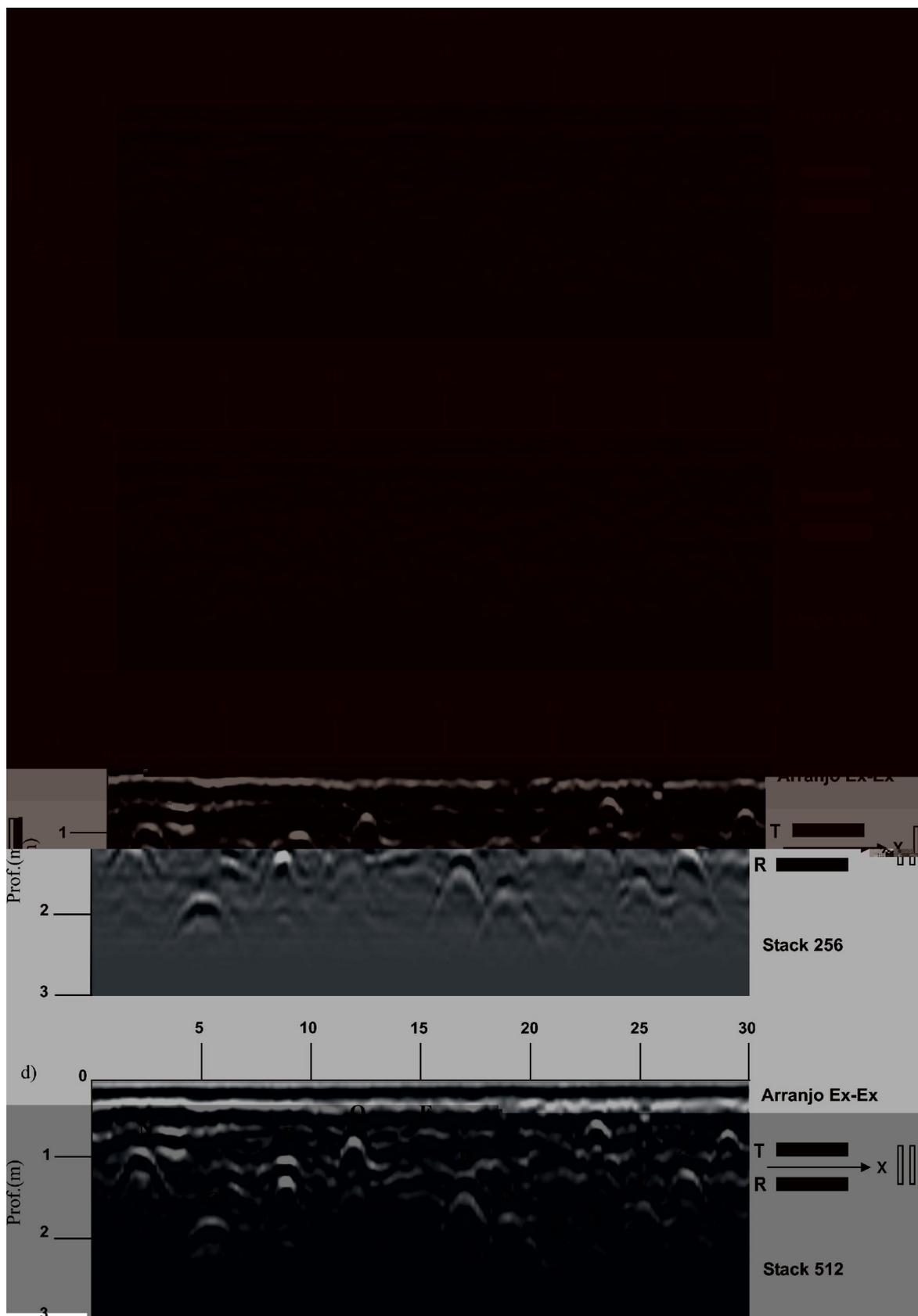


Figura 5.16 - Aquisições realizadas no modo passo a passo, arranjo Ex-Ex, frequência de 200MHz e espaçamento entre traços igual a 0,2m. a) stack 64, b) stack 128, c) stack 256 e d) stack 512.

apresentados (Figura 5.3 à 5.16) para a detecção das manilhas de concreto, os parâmetros ótimos para aquisição dos dados foram: i) modo passo a passo: arranjo de antenas Ex-Ex, frequência de 100MHz, espaçamento entre traços de 0,2m e stack 512, pois este último permite uma maior nitidez da imagem ao longo da profundidade e ii) modo contínuo: arranjo de antenas Ey-Ey, frequência de 100MHz, espaçamento entre traços de 0,05m e stack 32.

Para os perfis adquiridos com arranjos Ex-Ex e frequência de 100MHz todas as manilhas de concreto foram identificadas, independentemente dos diâmetros dos alvos e das profundidades em que se encontram. Como pode ser visto, devido a esse arranjo os alvos T e U passaram a ser identificados, apesar dos refletores serem de baixas amplitudes, fato que, até então não tinha ocorrido. Isso se deve em grande parte à boa profundidade de penetração que a onda eletromagnética gerada por essa antena possui e à melhor combinação entre as polarizações do pulso emitido pela antena transmissora em relação à disposição do alvo e a polarização da antena receptora.

Os resultados com arranjo de antenas Ex-Ex e frequência de 200MHz, também foram satisfatórios, pois também permitiram identificar todos os alvos, principalmente os alvos mais rasos, devido ao comprimento de onda gerado ser menor do que o da antena de 100MHz. No entanto, os alvos mais profundos, como as manilhas, R, S, T, U e V geraram reflexões mais fracas, quando comparadas às reflexões geradas pelas aquisições com antenas de 100MHz. O alvo F, correspondente ao cano metálico guia, foi detectado com a frequência de 200MHz e caracterizado como um refletor discreto. Isto foi possível devido à diminuição do comprimento de onda, o que possibilitou o aumento da resolução vertical.

Comparando-se os resultados dos dados reais e dos dados modelados, nota-se que, em ambos, o arranjo de antenas Ex-Ex com frequência de 100MHz apresentou os melhores padrões de refletores, imageando o mesmo conjunto de alvos, detectando até mesmo os alvos T e U que possuem pequenos diâmetros e estão localizados na profundidade de 2m. No

entanto, pode ser visto no perfil GPR modelado que, a base da manilha P, disposta verticalmente, foi detectada. Isso se deve ao fato do espaçamento entre traços utilizado na modelagem ser muito pequeno, o que contribui significativamente para o detalhamento da estrutura. Também pode ser visto no resultado modelado, que o tubo metálico guia foi bem visualizado, isso se deve, ao pequeno espaçamento entre traços, porém, esse refletor não foi visualizado nos dados de campo devido ao espaçamento entre os traços.

Os dados reais adquiridos nos modos Ey-Ey e Ex-Ex mostraram que as aquisições GPR realizadas com menor espaçamento entre traços aumentaram a resolução espacial, i.e., o detalhamento lateral e o aumento do stack permitiu obter uma imagem mais nítida da subsuperfície, na qual os alvos mais profundos puderam ser identificados com maior clareza.

Quanto aos padrões de reflexões dos alvos em subsuperfície através dos arranjos Ey-Ey e Ex-Ex, se deu pelos arranjos de antenas empregados, os quais proporcionaram diferentes combinações entre as polarizações do pulso emitido pela antena transmissora, a disposição do alvo em relação as posições das antenas e a polarização da antena receptora. Contudo, outros fatores também exerceram sua significância para o sucesso da detecção dos alvos, como, a geometria das estruturas, as suas dimensões (principalmente o diâmetro, para estruturas cilíndricas), o contraste entre as propriedades elétricas do background e do alvo estudado, a profundidade onde os objetos se encontram e o padrão de radiação das antenas (RADZEVICIUS, 2001).

A interpretação física que represente os fenômenos reais dessas respostas, através, de equações analíticas físico-matemáticas é muito complexa, devido a vários motivos, tais como, o comportamento dos campos eletromagnéticos com as heterogeneidades do meio e das estruturas estudadas, o controle dos ruídos presentes no momento da aquisição, a estabilidade do sistema GPR, etc. Sendo assim, vários pesquisadores desenvolveram estudos de modelagens, visando obter o entendimento dos padrões de reflexões e espalhamentos do sinal

eletromagnético nas estruturas cilíndricas em subsuperfície. Dentre eles, destacam-se os trabalhos de (ROBERTS; DANIELS, 1996) e (RADZEVICIUS; DANIELS, 2000). Esses trabalhos foram utilizados e serviram de referência para a justificativa dos padrões de refletores encontrados nessa pesquisa.

Esses autores estudaram o comportamento das magnitudes dos campos espalhados por alvos cilíndricos em função do ângulo de espalhamento e da razão, r/λ (raio do alvo/comprimento de onda incidente), para diferentes meios e diferentes alvos, os quais foram caracterizados através de valores de condutividade elétrica e permissividade dielétrica. Vale ressaltar que, devido ao pequeno offset normalmente empregado nas aquisições GPR, o ângulo de espalhamento da onda eletromagnética captada pela antena receptora é aproximadamente igual à 180° (backscattering) e essa é uma das condições que são estabelecidas para a análise da magnitude do espalhamento para os modos Ey-Ey e Ex-Ex (RADZEVICIUS; DANIELS, 2000).

Para comparar os resultados reais desta pesquisa com os dos trabalhos referidos, é apresentada a Tabela 5.2 com os valores das relações, r/λ (raio/comprimento de onda), para os três diâmetros das manilhas e as duas frequências de antenas utilizadas. Cabe salientar, que para determinar os valores de λ foi estabelecida a constante dielétrica igual a 18, pois esta foi a que melhor posicionou os alvos nos radargramas com relação às suas profundidades reais.

Tabela 5.2 – Valores de diâmetro d e da relação r/λ , para as três diferentes manilhas de concreto, frequências de 100MHz e 200MHz e razão da constante dielétrica ϵ (cilindro/solo)

d (m) Manilhas de concreto	r/λ para freq. 100MHz	r/λ para freq. 200MHz	ϵ (cilindro/solo)
0,7	0,5	1	0,27
0,48	0,35	0,69	0,27
0,26	0,18	0,37	0,27

Para melhor visualização dos resultados, as relações r/λ são apresentadas nas Figuras 5.17 e 5.18, através de linhas coloridas, sendo elas, 0,5 (linha azul cheia), 0,35 (linha azul tracejada), 0,18 (linha amarela), 0,37 (linha vermelha cheia), 0,69 (linha vermelha tracejada) e a relação r/λ igual a 1 não é apresentada nos gráficos por ser um valor discrepante.

Comparando-se o comportamento das magnitudes das bandas de espalhamento das Figuras 5.17 e 5.18, em função dos ângulos de espalhamento e da razão r/λ , nota-se que, à medida que, a razão r/λ é diminuída, mais constantes se tornam os valores de banda de espalhamento para o modo Ey-Ey, no entanto, no modo Ex-Ex, ocorre o contrário, ou seja, os valores de banda de espalhamento se tornam mais constantes, à medida que a razão r/λ é aumentada. Para os valores de espalhamentos de r/λ , da Tabela 5.2, as razões 0,5; 0,35 e 0,18, correspondentes aos refletores adquiridos com frequência de 100MHz, referentes às manilhas de diâmetros, 0,70m, 0,48m e 0,26m, respectivamente, apresentam maior banda de espalhamento relacionadas ao arranjo de antenas Ex-Ex, quando examinadas no ponto do espalhamento igual à 180° . Esse fato está de acordo com os resultados das aquisições sobre as linhas de manilhas de concreto, as quais, revelaram que os refletores que possuíam maiores resoluções espaciais e amplitudes foram àqueles adquiridos com arranjo de antenas Ex-Ex e frequência de 100MHz, como foi mostrado nos perfis GPR das Figuras 5.13 e 5.14.

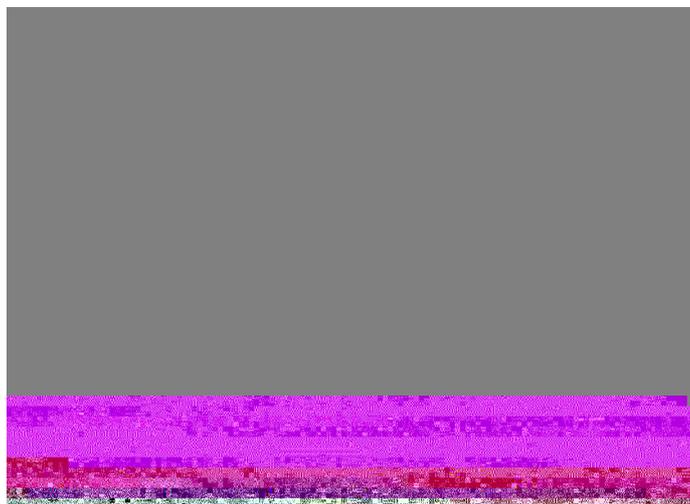


Figura 5.17 – Banda de espalhamento em função do ângulo espalhado para arranjo Ey-Ey.(Modificada de Radzevicius e Daniels, 2000)

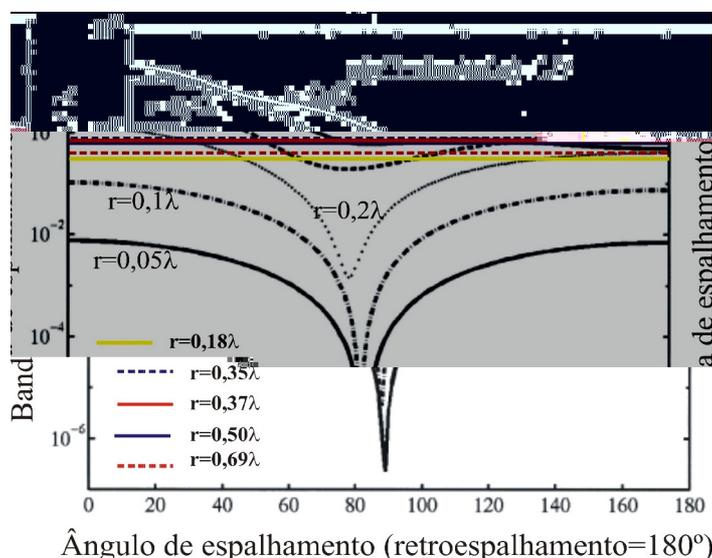


Figura 5.18 – Gráfico da banda de espalhamento em função do ângulo espalhado para o arranjo Ex-Ex. (Modificada de Radzevicius; Daniels, 2000)

Os valores r/λ iguais a 0,37 e 0,69, correspondentes aos refletores adquiridos com frequência de 200MHz, referentes às manilhas com diâmetros de 0,26m e 0,48m, respectivamente, também apresentaram valores de banda de espalhamento maiores para a modelagem com aquisição Ex-Ex, quando estes são examinados no ponto do retroespalhamento (180°). No entanto, cabe ressaltar que os alvos mais profundos (em 2m de profundidade) relacionados a esses refletores, foram visualizados, através, de refletores muito sutis, devido principalmente ao fato da atenuação da onda eletromagnética ser dependente da profundidade e se dar com maior intensidade para ondas EM de maiores frequências.

A última relação r/λ igual a 1 não pode ser enquadrada nos resultados desses modelos, no entanto, por se tratar dos refletores correspondentes às manilhas de concreto de maiores diâmetros, observa-se que os resultados foram excelentes.

Apesar dos modelos apresentados nas Figuras 5.17 e 5.18 terem sido realizados para tubos de pvc com diâmetro de 0,076m, (RADZEVICIUS; DANIELS, 2000) estes puderam ser aplicados de maneira satisfatória para a grande maioria das manilhas de concreto.

Segundo Radzevicius; Daniels, 2000, outro parâmetro interessante a ser analisado refere-se à banda de espalhamento em função do parâmetro r/λ . A Figura 5.19 mostra essa relação considerando as polarizações das antenas Ey-Ey (linha cheia) e Ex-Ex (linha tracejada). Como pode ser visto, essa modelagem confirma dois resultados importantes mostrados pelos perfis GPR. O primeiro é que quanto menor a relação r/λ , ou seja, quanto menor o raio do alvo cilíndrico em relação ao comprimento de onda incidente sobre sua superfície sua detecção se torna mais dependente da polarização dos arranjos das antenas e isso pode ser comprovado nos perfis GPR, principalmente, através dos refletores das manilhas de pequeno diâmetro, as quais são melhores detectadas pelo arranjo de antenas Ex-Ex. A segunda é que, à medida que, essa relação vai aumentando, ou seja, à medida que, o raio do alvo cilíndrico se torna mais próximo ou maior do que o comprimento de onda incidente sobre sua superfície, menos dependente da polarização são essas estruturas, pois, ambos os arranjos passam a apresentar bandas de espalhamento similares, sendo assim, facilmente identificados, sendo que, isso pode ser observado nos dados reais, através dos refletores provenientes das manilhas grandes (0,70cm de diâmetro) em ambos arranjos de antenas.

Dessa maneira, observa-se que, de modo geral, para a maioria dos alvos cilíndricos investigados nesta pesquisa o arranjo de antenas Ex-Ex possui bandas de espalhamentos maiores do que o arranjo de antenas Ey-Ey, permitindo então, que os alvos sejam melhores identificados com as antenas no modo Ex-Ex. Para realçar esse fato, a seguir são apresentados alguns espectros de amplitudes para os refletores N, Q e Z, adquiridos com frequência de 100MHz e arranjos Ex-Ex e Ey-Ey.

As Figuras 5.20 e 5.21 apresentam os espectros de amplitudes dos dados brutos, referentes a um traço de radar 12 do topo da manilha de concreto N, adquiridos com frequência de 100MHz para os arranjos Ey-Ey e Ex-Ex, respectivamente. Como pode ser

notado, o traço GPR que possui maior valor de amplitude é o adquirido com arranjo de antenas Ex-Ex, chegando ao valor de amplitude de aproximadamente 3×10^5 .

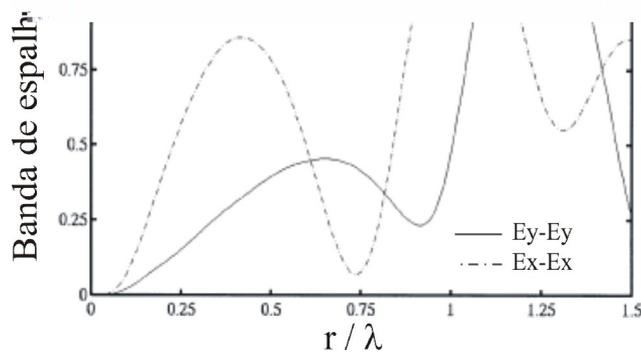


Figura 5.19 - Gráfico da banda de espalhamento em função da relação r/λ . (Modificada de Radzevicius, 2000).

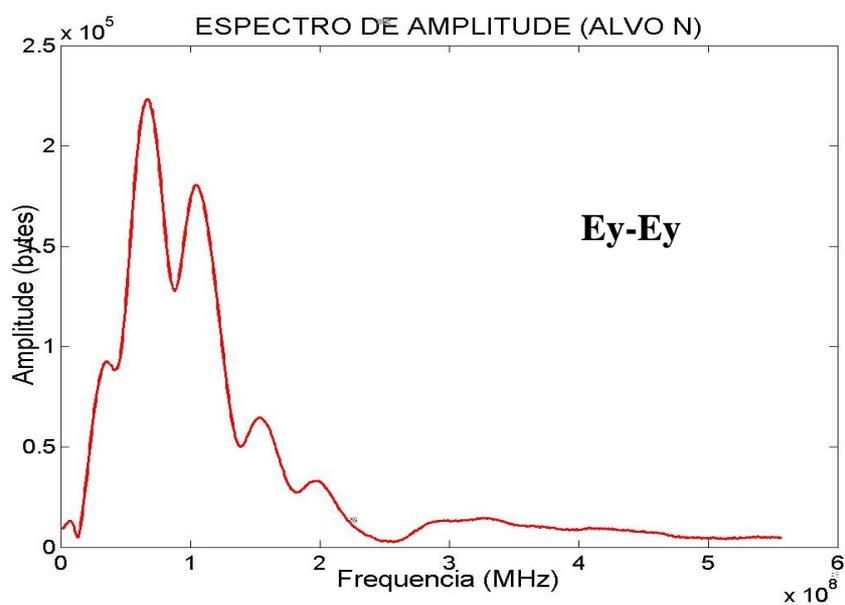


Figura 5.20 – Espectro de amplitude de um traço GPR referente ao topo do refletor da manilha N de frequência 100MHz para o arranjo Ey-Ey

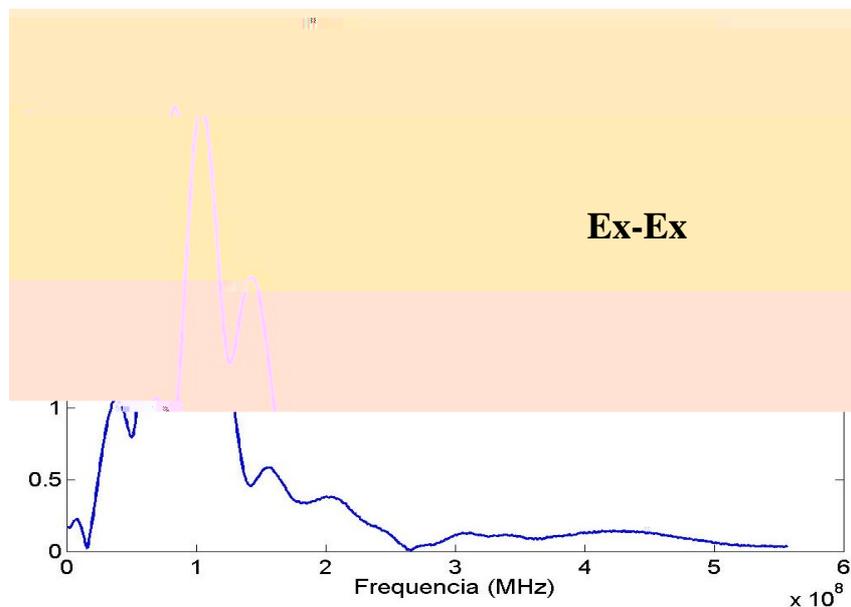


Figura 5.21 - Espectro de amplitude de um traço GPR referente ao topo do refletor da manilha N de frequência 100MHz para o arranjo Ex-Ex

O mesmo comportamento pode ser visto nas Figuras 5.22 e 5.23, referentes aos espectros GPR do traço 61 do topo do refletor Q adquirido com frequência de 100MHz, onde o modo Ex-Ex apresenta um valor de amplitude de aproximadamente $2,7 \times 10^5$.

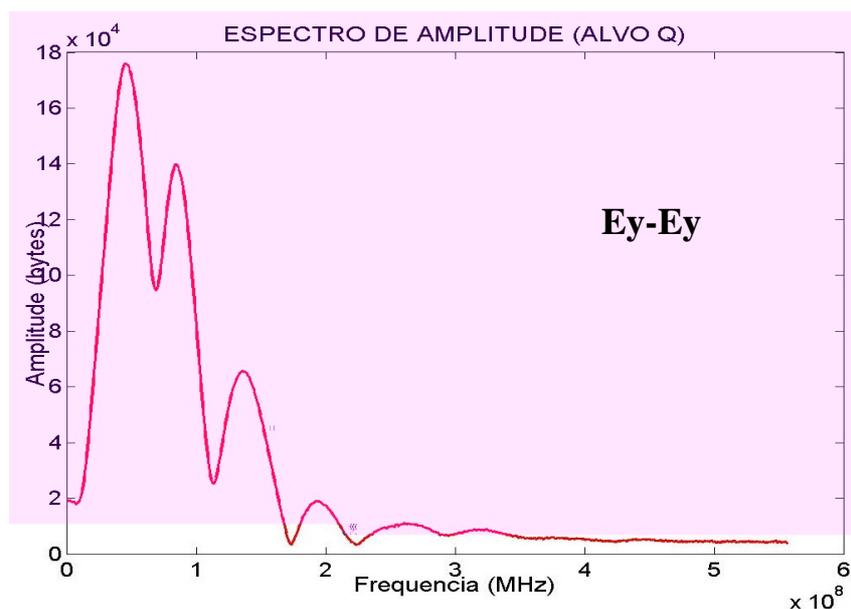


Figura 5.22 - Espectro de amplitude de um traço GPR referente ao topo do refletor da manilha Q de frequência 100MHz para o arranjo Ey-Ey

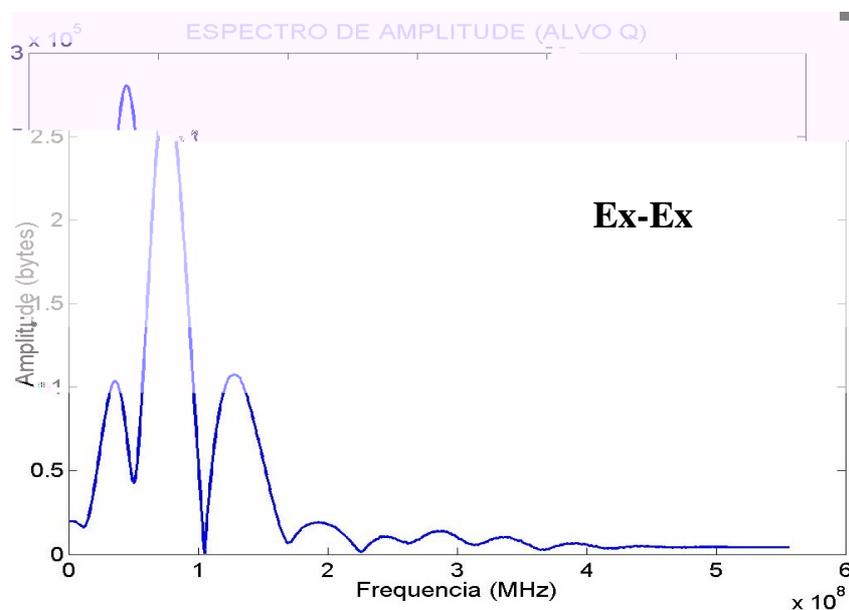


Figura 5.23 - Espectro de amplitude de um traço GPR referente ao topo do refletor da manilha Q de frequência 100MHz para o arranjo Ex-Ex

Nas Figuras 5.24 e 5.25, referentes ao traço GPR 146 do refletor do topo da manilha Z, pode-se perceber que apesar dos valores de amplitudes serem próximos, o modo Ex-Ex espalha maior conteúdo de frequências do que o modo Ey-Ey, o que aumenta as chances de visualização desses alvos, os quais representam as menores estruturas das linhas de manilhas de concreto.

Portanto, pode se afirmar que, o fator que apresenta maior relevância na detecção de estruturas cilíndricas é o arranjo de antenas empregado na aquisição dos dados, devido à combinação entre as polarizações da onda eletromagnética emitida pela antena transmissora, a disposição do objeto, uma vez que, este atua como objeto espalhador e a polarização da antena receptora.

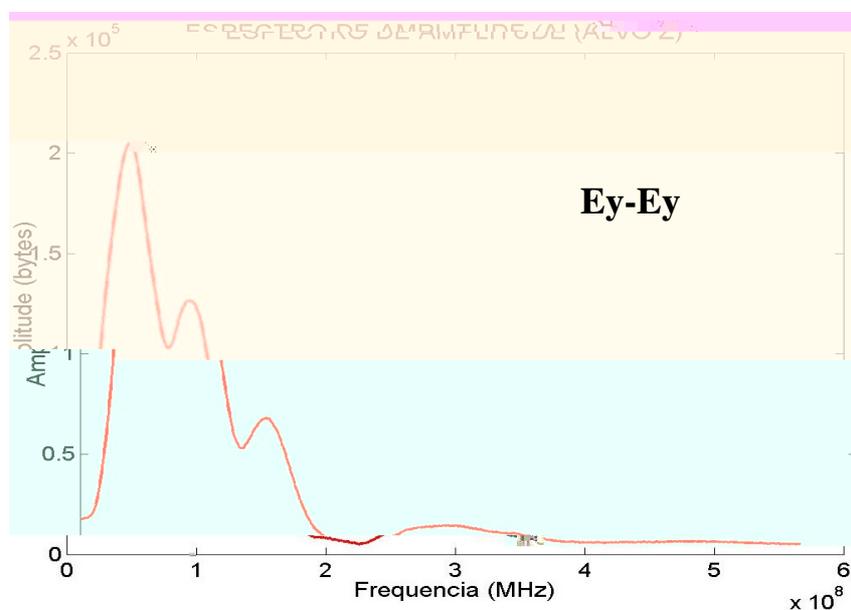


Figura 5.24 - Espectro de amplitude de um traço GPR referente ao topo do refletor da manilha Z de frequência 100MHz para o arranjo Ey-Ey

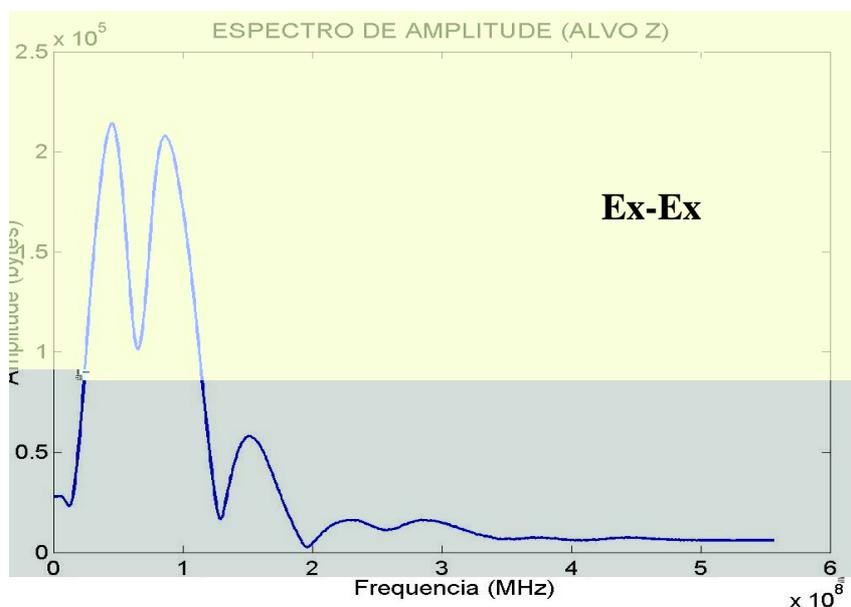


Figura 5.25 - Espectro de amplitude de um traço GPR referente ao topo do refletor da manilha Z de frequência 100MHz para o arranjo Ex-Ex

No entanto, há outras razões que influenciam na geração dos padrões de refletores, tais como, a perda por espalhamento no alvo, ou seja, quando um objeto possui uma dimensão menor que o comprimento da onda eletromagnética que incide sobre sua superfície, há uma

grande perda devido ao grande ângulo de abertura com que as frentes de ondas são espalhadas, fazendo com que grande parte da energia refletida não seja captada pela zona de Fresnel. Outro fator importante, e que é indiferente para quaisquer geometrias de interfaces é a atenuação da onda eletromagnética pelo meio que é dada em função da profundidade, ou seja, os alvos localizados em regiões mais profundas possuem, naturalmente, menores chances de serem identificados. Desse modo, quando estes fatores se aplicam às estruturas de pequenos diâmetros, então, as chances destas serem localizadas são mínimas. Isso explica o fato dos alvos mais profundos da linha de manilhas de concreto serem os que possuem os padrões de reflexões com menores amplitudes.

Um fator que também influencia na detecção das manilhas é a sua composição, por exemplo, as manilhas de concreto com 0,70m de diâmetro (possuem uma malha de ferro em sua estrutura) e as manilhas com 0,48 e 0,26m de diâmetros são feitas apenas por cimento. Neste caso, os campos eletromagnéticos atuam de formas diferentes em objetos condutores e dielétricos, e as manilhas com maiores diâmetros, i.e., com ferro, apresentam refletores com maior amplitude. Por exemplo, apesar das manilhas N, O e P serem consideradas dielétricas, elas possuem em sua estrutura, uma malha de ferro, e que certamente exerce influências nos padrões das respostas desses refletores. Quando estas manilhas são submetidas à determinada polarização incidente, através dos arranjos de antenas, pode haver a amplificação do sinal eletromagnético incidente em sua superfície, fazendo com que o sinal captado pela antena receptora seja de maior intensidade.

5.3.2- Linha de tubulação de pvc

A seguir, são apresentados os perfis GPR adquiridos com os seguintes parâmetros, modo de aquisição passo a passo, arranjo de antenas Ey-Ey, frequência de 100MHz e espaçamento entre traços de 0,2m, sendo que, a Figura 5.26 mostra os perfis GPR sobre a linha de tubos de pvc com stacks variando de 4 à 32 e a Figura 5.27 mostra as aquisições realizadas com stacks variando de 64 à 512.

Examinando-se os perfis GPR presentes na Figura 5.26, pode-se notar que, a imagem foi gradativamente melhorada com o aumento sucessivo do empilhamento até o stack com valor 32, onde, a partir de valores maiores não foram notadas melhorias significativas nas imagens. Para essas seções, esse fato pode ser claramente percebido ao longo de cada perfil, principalmente, quando a análise comparativa entre esses perfis é realizada examinando-se as partes mais profundas das seções GPR. Esse aumento gradativo na melhoria da imagem com o aumento do stack, produzido pelo aumento da razão sinal/ruído, é de grande importância, principalmente para objetos que possuem pequenos diâmetros e que estejam localizados em regiões mais profundas.

Apesar do empilhamento ser aumentado constantemente nenhum tubo de pvc pode ser identificado, apenas o tubo metálico guia (F) na posição de 15m. Também é visto um refletor que vai da posição 10 a 13m, o qual, não se refere a um alvo instalado nessa área, mas sim, a um pacote de sedimento, correspondente ao aterro. Vale a pena salientar também, que entre as

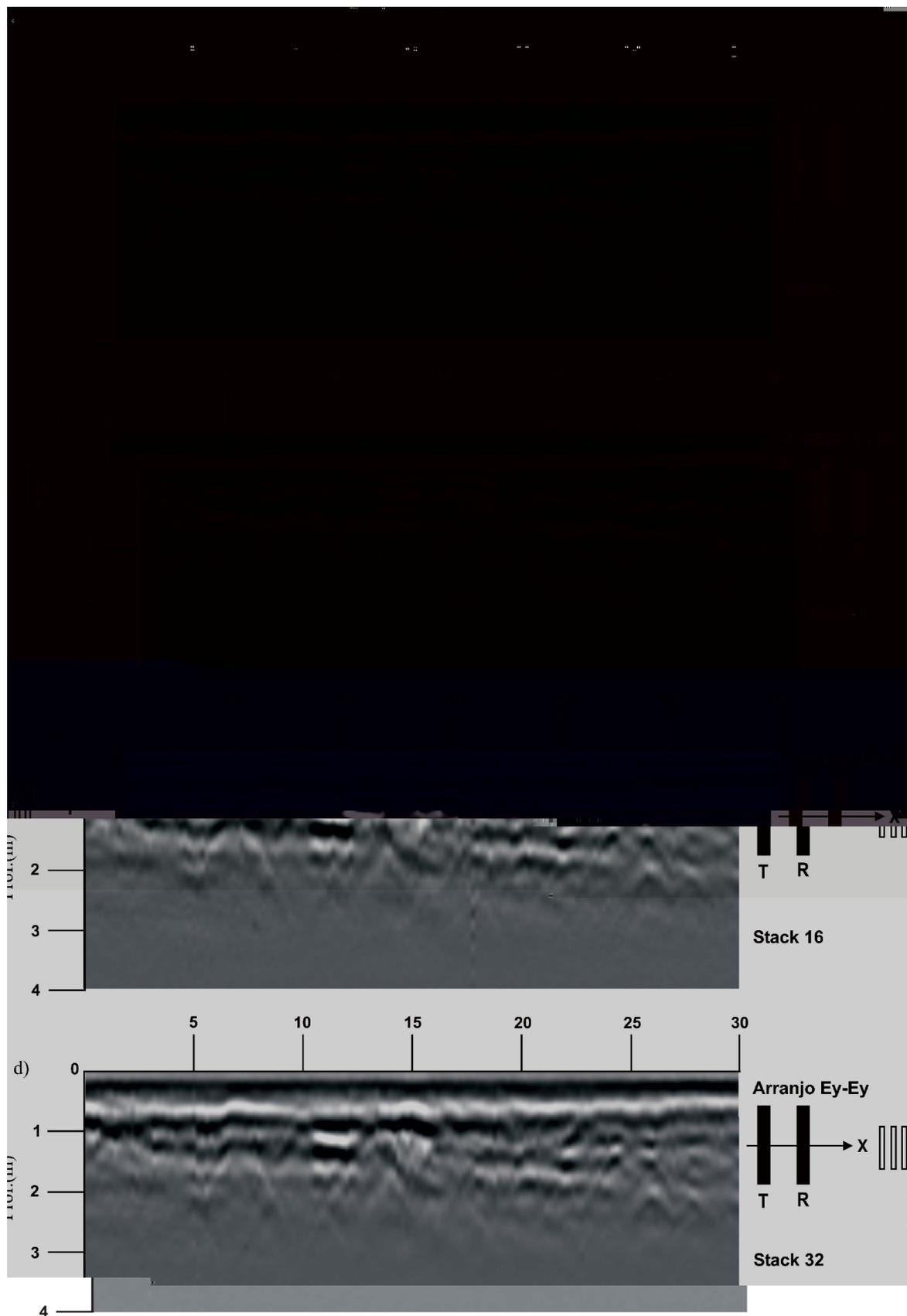


Figura 5.26 – Aquisições realizadas no modo passo a passo, arranjo Ey-Ey, frequência de 100MHz e espaçamento entre traços de 0,2m. a) stack 4, b) stack 8, c) stack 16 e d) stack 32.

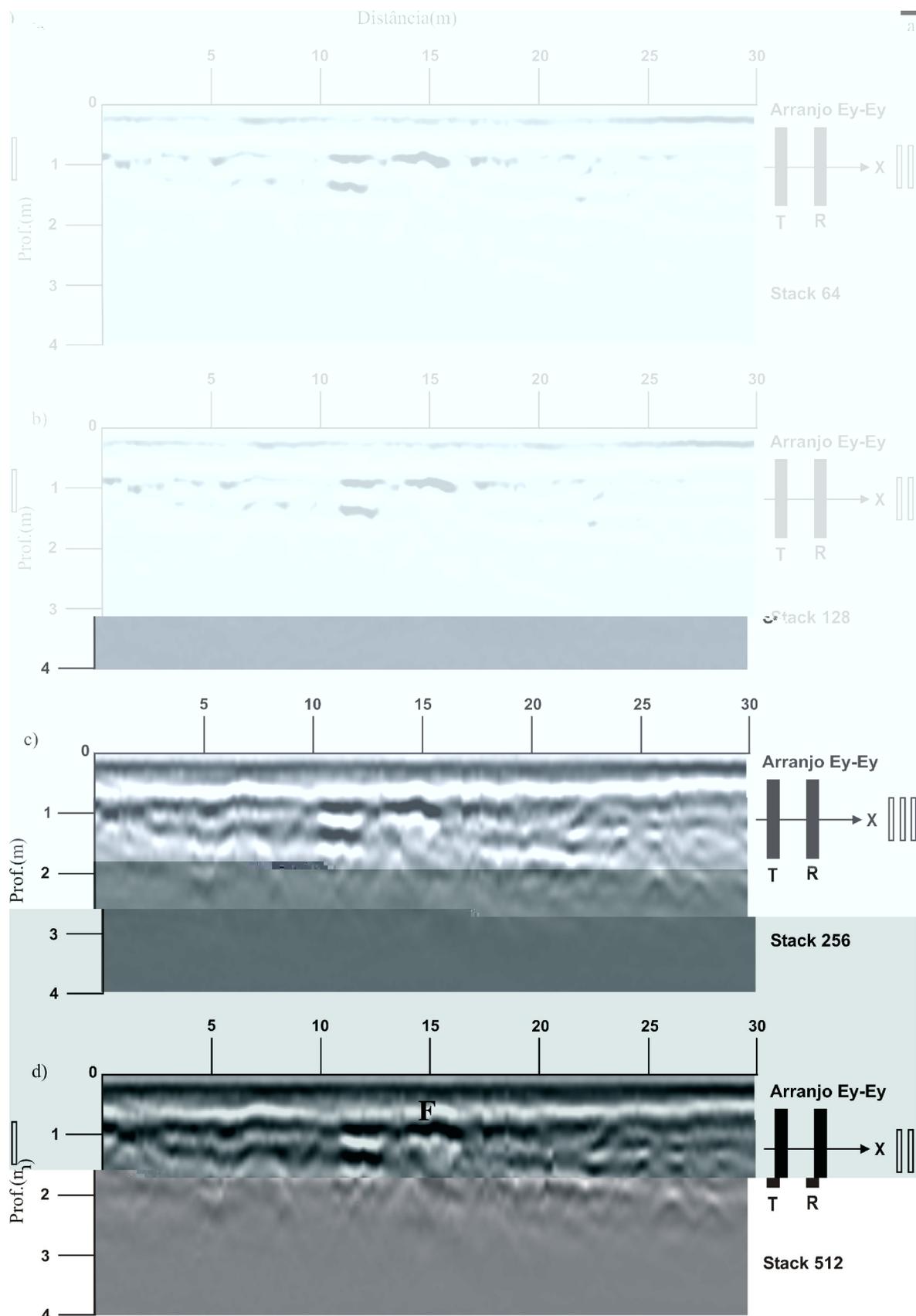


Figura 5.27 – Aquisições realizadas no modo passo a passo, arranjo Ey-Ey, frequência de 100MHz e espaçamento entre traços de 0,2m. a) stack 64, b) stack 128, c) stack 256 e d) stack 512.

posições 24m e 28m são notadas algumas hipérbolas pequenas, as quais, não se referem aos alvos instalados no SCGR, mas, provavelmente às valetas cavadas para inserir os tubos de pvc localizados nas posições de 25m e 27m. Esses refletores não poderiam ser provenientes dos tubos de pvc vazios, os quais, estão abaixo de 1m de profundidade e, dentre todos os alvos instalados, estes são os que possuem menor contraste de impedâncias.

As aquisições da Figura 5.27 realizadas com, modo passo a passo, frequência de 100MHz, arranjo de antenas Ey-Ey e stacks variando de 64 a 512 apresentaram os mesmos resultados das aquisições mostradas na Figura 5.26, ou seja, foram identificadas as mesmas estruturas, como, o tubo metálico guia na posição de 15m, o refletor contínuo que vai da posição de 10m a 13m e as pequenas hipérbolas, provavelmente, relacionadas às valetas cavadas para inserir os tubos de pvc.

A seguir, são apresentadas as seções adquiridas com modo contínuo, frequência de 100MHz, stacks de 4 à 32 e espaçamento entre traços iguais a 0,2m, 0,1m e 0,05m. Assim, como na análise empregada para a seção de manilhas de concreto, nesta para tubos de pvc foram feitas comparações entre os perfis adquiridos com os mesmos espaçamentos entre traços e diferentes empilhamentos, visando, estabelecer a influência do aumento do empilhamento na qualidade da imagem. Também foram feitas comparações entre as aquisições realizadas com os mesmos empilhamentos, mas, com espaçamentos entre traços diferentes, visando, estabelecer a influência da variação dos espaçamentos entre traços nas aquisições dos dados. Por último, são apresentadas as comparações entre as seções dos modos, passo a passo e contínuo para frequências de 100MHz e arranjos de antenas Ey-Ey. Assim, são apresentados os radargramas reais adquiridos sobre as tubulações de pvc com o modo contínuo, arranjo de antenas Ey-Ey, frequência de 100MHz e empilhamentos variando de 4 à 32, onde a Figura 5.28 mostra o perfil com espaçamento entre traços de 0,2m, a Figura 5.29 mostra o perfil com o espaçamento de 0,1m e a Figura 5.30 mostra o perfil com

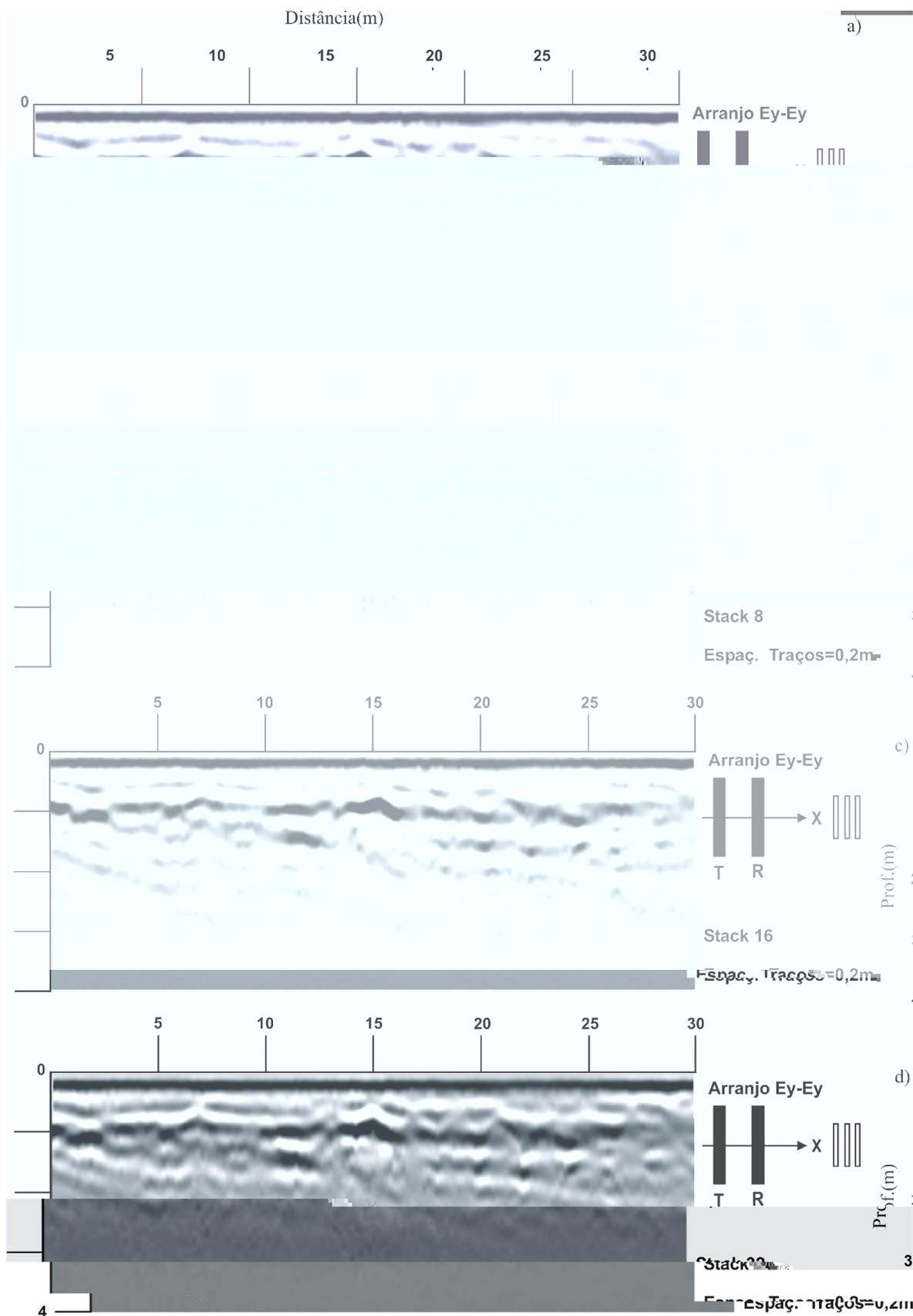


Figura 5.28 – Aquisições realizadas no modo contínuo, arranjo Ey-Ey, frequência de 100MHz e espaçamento entre traços igual a 0,2m. a) stack 4, b) stack 8, c) stack 16 e d) stack 32.

espaçamento de 0,05m.

Através, de uma análise visual e comparativa entre cada seção GPR, com mesmos espaçamentos entre traços e diferentes valores de empilhamentos, como são os casos das seções contidas nas Figuras 5.28, 5.29 e 5.30, nota-se que os perfis GPR que foram adquiridos com maiores valores de empilhamentos possuem melhor nitidez em toda a seção, principalmente, ao longo da profundidade.

Comparando-se as seções adquiridas com empilhamentos iguais e diferentes espaçamentos entre traços, pode-se concluir que, não houve melhoria visual dos refletores dos tubos de PVC implantadas no SCGR. Além disso, comparando-se as aquisições provenientes dos modos passo a passo e contínuo, ambos, realizados com frequência de 100MHz e arranjos de antenas Ey-Ey, constata-se que apenas o tubo metálico guia F foi imageado.

Como é observado, nestas aquisições foram utilizados diversos parâmetros para o levantamento dos dados, tais como, empilhamentos e espaçamentos entre traços, assim, como nas aquisições realizadas sobre as manilhas de concreto. Apesar, dos pequenos diâmetros dos alvos eram esperadas respostas, principalmente, das aquisições no modo contínuo com espaçamento entre traços de 0,05m. Contudo, isso não ocorreu, devido, a alguns motivos como, baixo contraste entre as propriedades dielétricas dos tubos de PVC e do background, grande espaçamento entre traços em relação aos diâmetros dos alvos, comprimento de onda (λ) relativamente alto em relação ao diâmetro dos tubos, aproximadamente igual a 0,70m.

Sendo assim, são apresentadas a seguir aquisições com frequências de 200MHz, onde a Figura 5.31 mostra aquisições com stacks de 4 a 32 e a Figura 5.32 mostra aquisições com stacks variando de 64 a 512, ambas, no modo passo a passo e arranjos Ey-Ey.

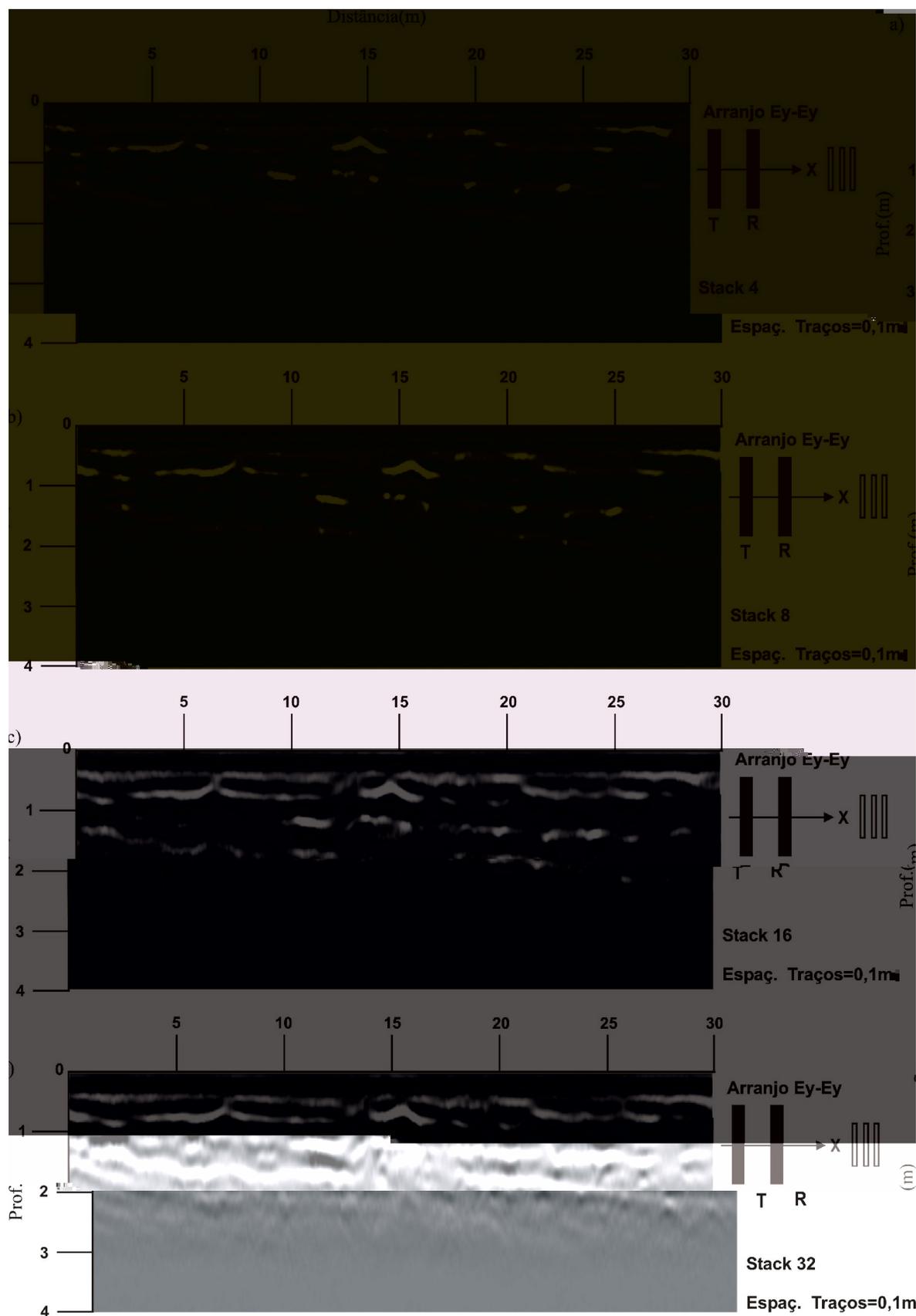


Figura 5.29 – Aquisições realizadas no modo contínuo, arranjo Ey-Ey, frequência de 100MHz e espaçamento entre traços igual a 0,1m. a) Stack 4, b) Stack 8, c) Stack 16 e d) Stack 32.

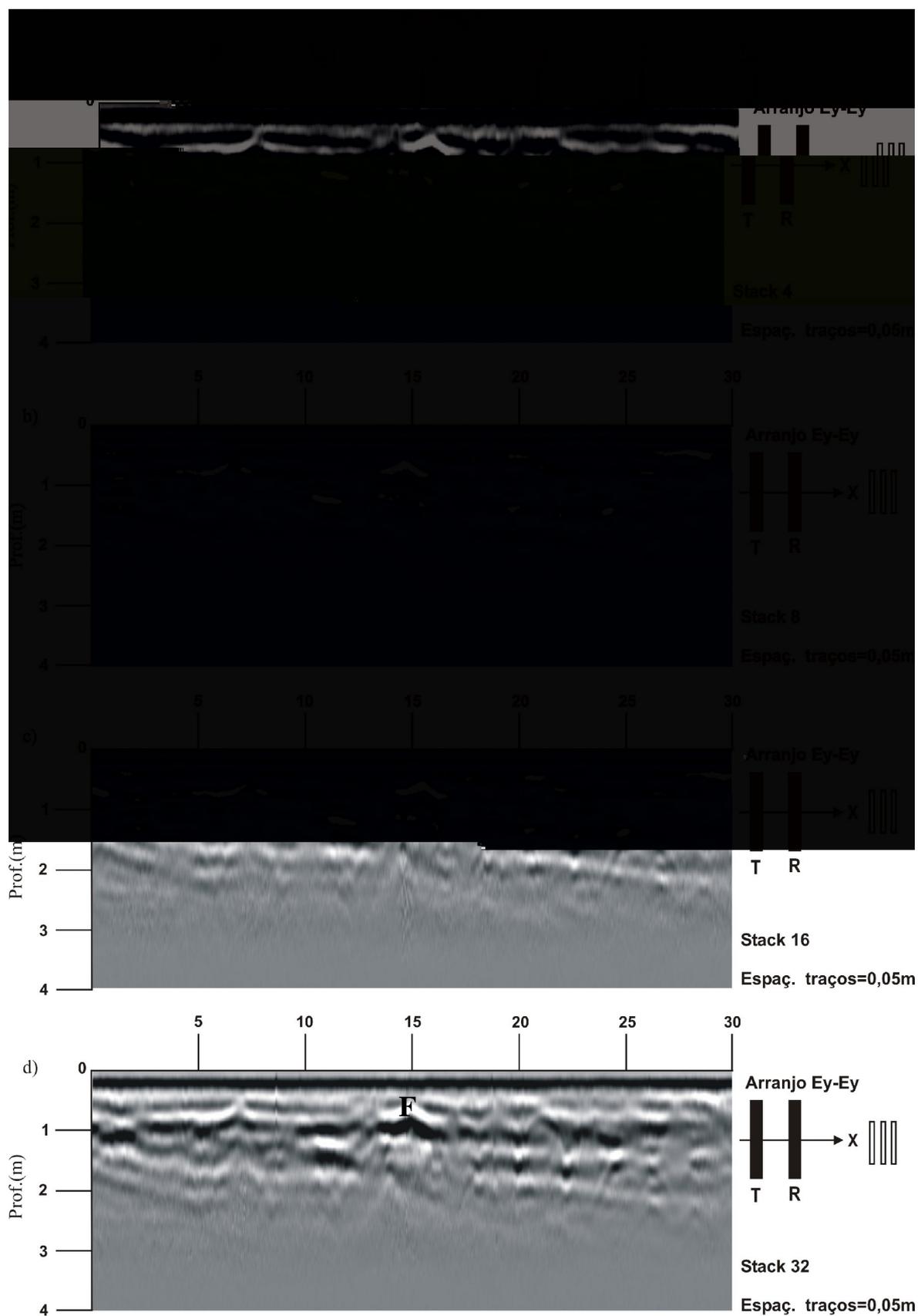


Figura 5.30 - Aquisições realizadas no modo contínuo, arranjo Ey-Ey, frequência de 100MHz e espaçamento entre traços igual a 0,05m. a) Stack 4, b) Stack 8, c) Stack 16 e d) Stack 32.

Examinando-se as Figuras 5.31 e 5.32, pode-se notar que, apesar dos valores de empilhamentos serem aumentados sucessivamente, de perfil para perfil, nenhuma mudança visual significativa pode ser apontada, ou seja, as seções mostradas em ambas as figuras apresentaram imagens similares.

No entanto, quando comparamos essas seções GPR com as adquiridas com frequências de 100MHz são encontradas diferenças nítidas, pois com a mudança da frequência de 100MHz para 200MHz foi possível identificar alguns refletores, que até então não haviam sido identificados, como por exemplo, os refletores, A e I referentes, respectivamente, aos tubos preenchido e semi preenchido por água de torneira, além do tubo de pvc vazio J e do tubo metálico guia F.

Como pode ser notado, a visualização desses alvos se tornou possível, devido à diminuição do comprimento de onda, proporcionado pela antena de 200MHz, a qual possibilitou o aumento da resolução vertical.

Devido, ao fato das outras estruturas não serem identificadas, se fez necessário mais aquisições, porém, no modo contínuo, pois, através deste torna-se possível a utilização de espaçamentos entre traços menores, os quais, aumentam a resolução lateral das estruturas estudadas, sendo adequados à visualização de estruturas de pequenos diâmetros, como, os tubos de pvc. Dessa maneira, são apresentadas a seguir, as aquisições com os seguintes parâmetros, modos contínuos, frequências de 200MHz, arranjos de antenas Ey-Ey e stacks (empilhamentos) variando de 4 a 32, onde a Figura 5.33 corresponde às aquisições com espaçamentos entre traços iguais a 0,2m, a Figura 5.34, corresponde às aquisições com espaçamentos entre traços iguais a 0,1m e a Figura 5.35, corresponde às aquisições com espaçamentos entre traços iguais a 0,05m.

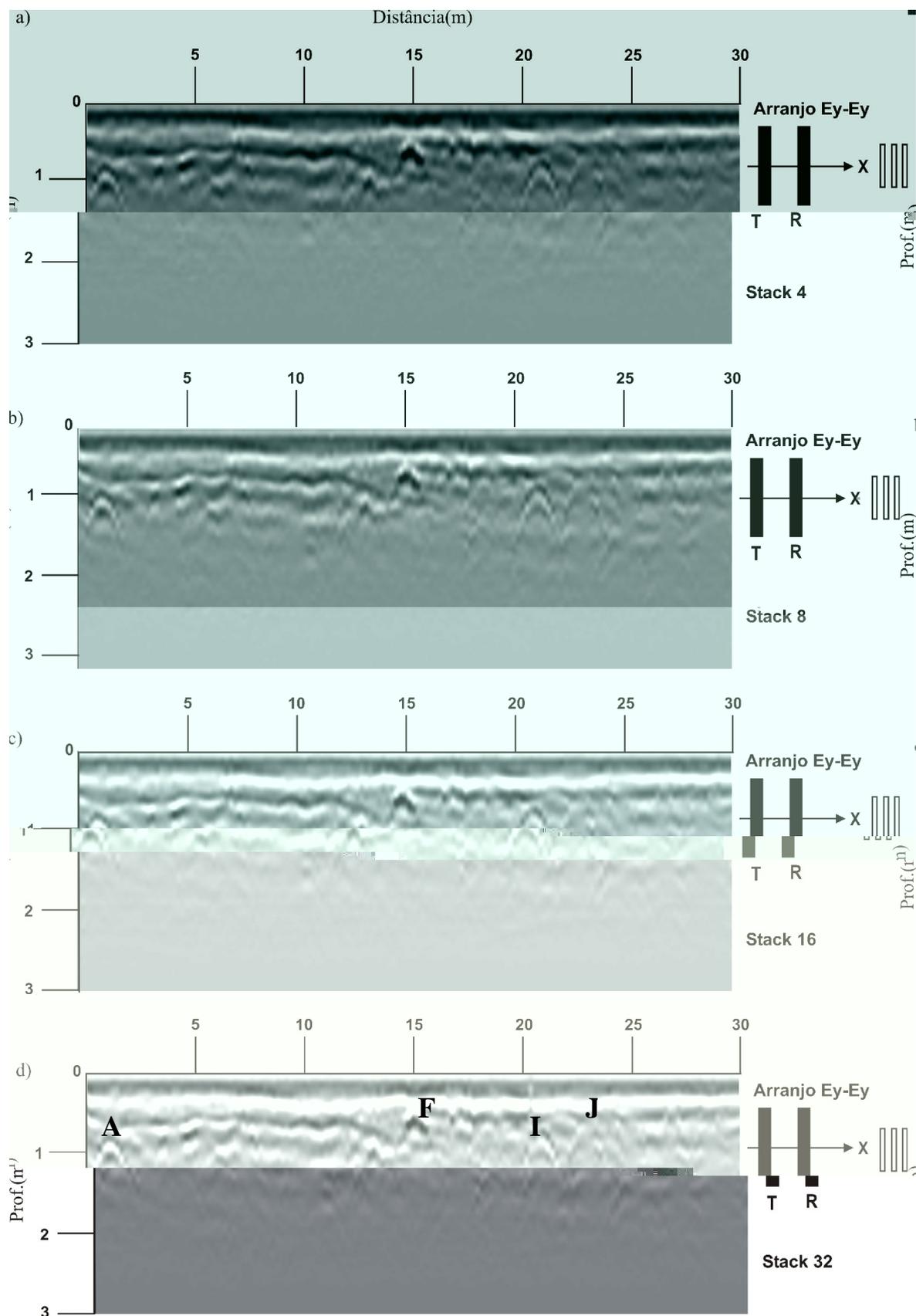


Figura 5.31 – Aquisições realizadas no modo passo a passo, arranjo Ey-Ey, frequência de 200MHz e espaçamento entre traços de 0,2m. a) stack 4, b) stack 8, c) stack 16 e d) stack 32.

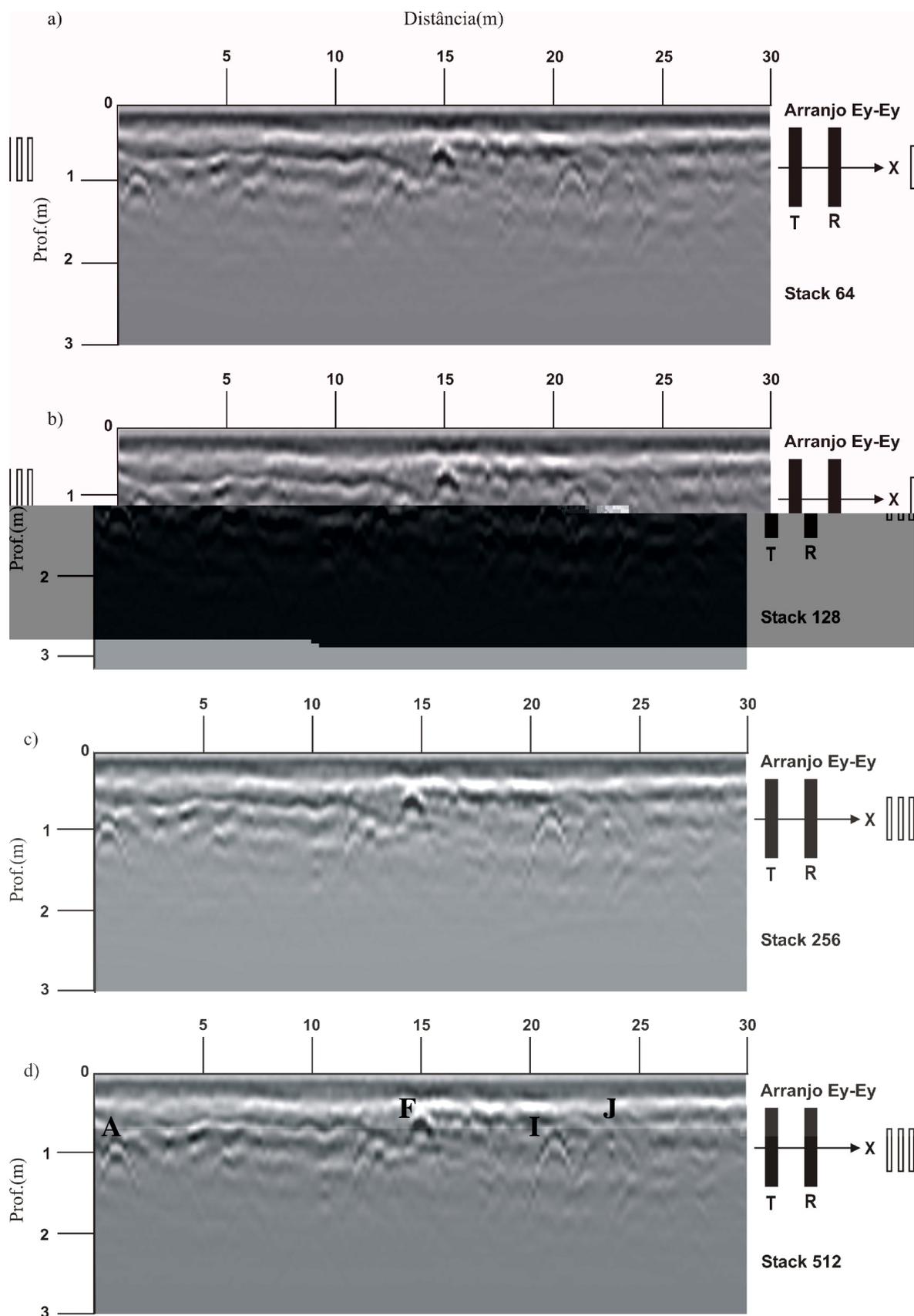


Figura 5.32 – Aquisições realizadas no modo passo a passo, arranjo Ey-Ey, frequência de 200MHz e espaçamento entre traços de 0,2m. a) stack 64, b) stack 128, c) stack 256 e d) stack 512.

Comparando-se as seções com empilhamentos diferentes e espaçamentos entre traços iguais, pode-se notar de maneira geral, que, à medida que, o empilhamento é aumentado as seções passam a ter maior nitidez, principalmente, comparando-se as partes mais profundas das seções GPR. No entanto, as maiores diferenças entre os refletores dos perfis GPR são percebidas, quando, são comparadas seções com empilhamentos iguais e diferentes espaçamentos entre traços, ou seja, os alvos passam a ser melhor visualizados com maior resolução lateral, à medida que, o espaçamento entre traços é diminuído, visto que, a estrutura é melhor detalhada, pois, haverá mais traços por unidade de comprimento investigado.

No entanto, mesmo no modo contínuo, onde foram aplicadas variações dos parâmetros de empilhamento e espaçamento entre traços, não foi possível a identificação de outros alvos, além dos já mencionados, A e I, relacionados, respectivamente, aos alvos totalmente e parcialmente preenchidos por água, e do alvo F, sendo este último, referente ao tubo metálico guia.

Portanto, pode-se resumir, dentre todas as aquisições realizadas com as antenas no modo Ey-Ey, que apenas os alvos mais rasos foram detectados, sendo que, os alvos A e I, preenchido e semi preenchido por água, respectivamente, apresentaram refletores com maiores amplitudes do que o alvo J correspondente ao alvo vazio e, para estes, os parâmetros que apresentaram maior eficiência na detecção foram, modo contínuo com frequência de 200MHz, espaçamento entre traços de 0,05m e stack (empilhamento) igual a 32, pois o conjunto destes parâmetros proporcionou maior resolução vertical e lateral ao longo de todo perfil.

Até o momento foi utilizado apenas um arranjo de antenas, o Ey-Ey, o qual, corresponde apenas a um tipo de polarização. Assim, para estudar o efeito da polarização sobre as imagens são apresentados a seguir os perfis adquiridos sobre outra polarização, ou seja, com o arranjo de antenas Ex-Ex.

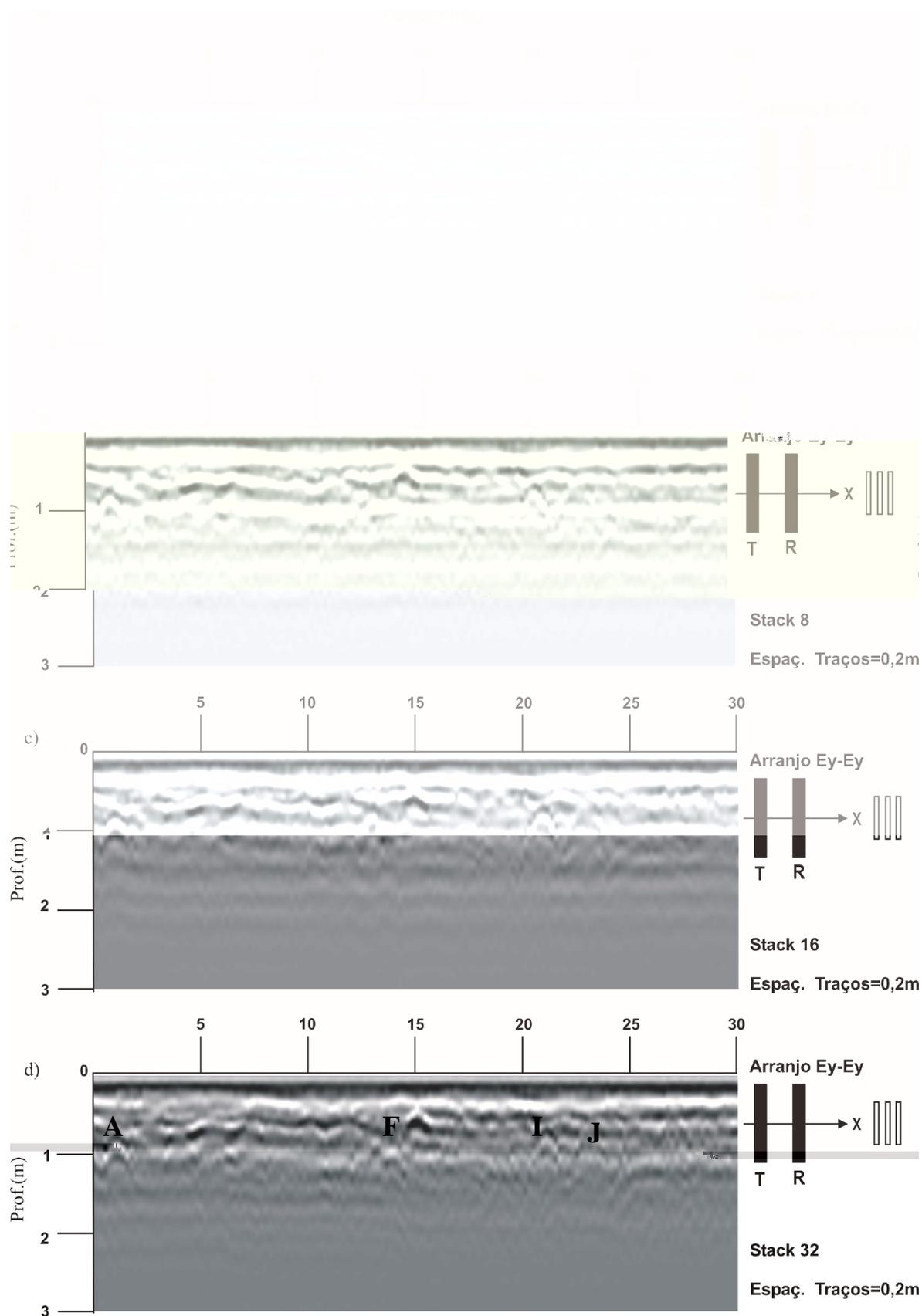


Figura 5.33 – Aquisições realizadas no modo contínuo, arranjo Ey-Ey, frequência de 200MHz e espaçamento entre traços igual a 0,2m. a) stack 4, b) stack 8, c) stack 16 e d) stack 32

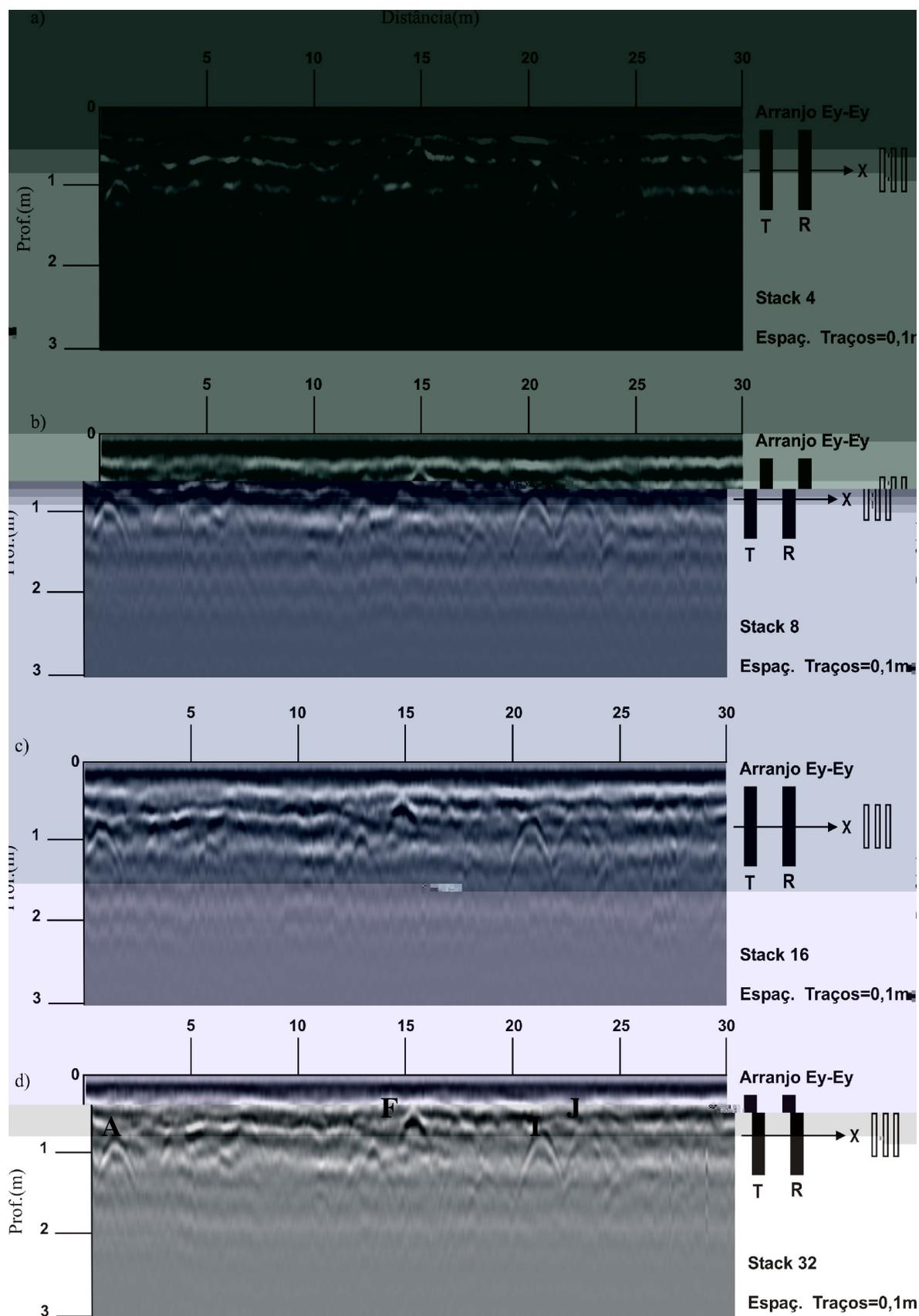


Figura 5.34 – Aquisições realizadas no modo contínuo, arranjo Ey-Ey, frequência de 200MHz e espaçamento entre traços igual a 0,1m. a) stack 4, b) stack 8, c) stack 16 e d) stack 32.

A seguir são apresentadas as Figuras 5.36 e 5.37, onde, ambas, apresentam as aquisições realizadas no modo passo a passo, com frequência de 100MHz, arranjo de antenas Ex-Ex, sendo que a Figura 5.36 apresenta os perfis correspondentes à variação de stacks de 4 a 32 e a Figura 5.37 apresenta os perfis adquiridos com stacks variando de 64 a 512.

Como observado anteriormente, nota-se o efeito do aumento do stack nas seções apresentadas nas Figuras 5.36 e 5.37, pois à medida que, o empilhamento é aumentado, as seções apresentam melhorias sucessivas na qualidade da imagem, mas os tubos de pvc não foram identificados devido à frequência utilizada e à profundidade de localização.

Visando aumentar a resolução dos refletores, a seguir são apresentadas as aquisições realizadas com antenas de 200MHz e arranjo de antenas Ex-Ex. A Figura 5.38, apresenta as aquisições realizadas com os stacks variando de 4 a 32 e a Figura 5.39, apresenta as aquisições onde o empilhamento aplicado variou de 64 a 512.

Mediante a análise desses dados, pode-se constatar que a melhoria da imagem GPR, relacionada ao empilhamento pode ser notada até a seção adquirida com stack 16, sendo que, a partir da Figura 5.38d, correspondente à seção com stack igual a 32, não é notada mais mudanças nas imagens. Pode-se notar também que nas aquisições realizadas com as antenas de 200MHz é apresentado, em todas seções, um refletor localizado na posição 23m e profundidade de 0,5m, correspondente ao alvo J, vazio. Embora, o refletor proveniente desse alvo seja sutil, nenhum outro, até então, obteve melhor resultado. Sendo assim, pode-se adotar, que para tubos vazios com baixo valor de permissividade dielétrica, como é o caso dos tubos de pvc vazios, o melhor arranjo de antenas é o Ex-Ex, o qual está em pleno acordo com os resultados mostrados nas modelagens de Robert; Daniels (1996), os quais modelaram diversos arranjos de antenas para tubos de pvc, identificando que para tubos de pvc vazios o arranjo Ex-Ex obtiveram melhores resultados.

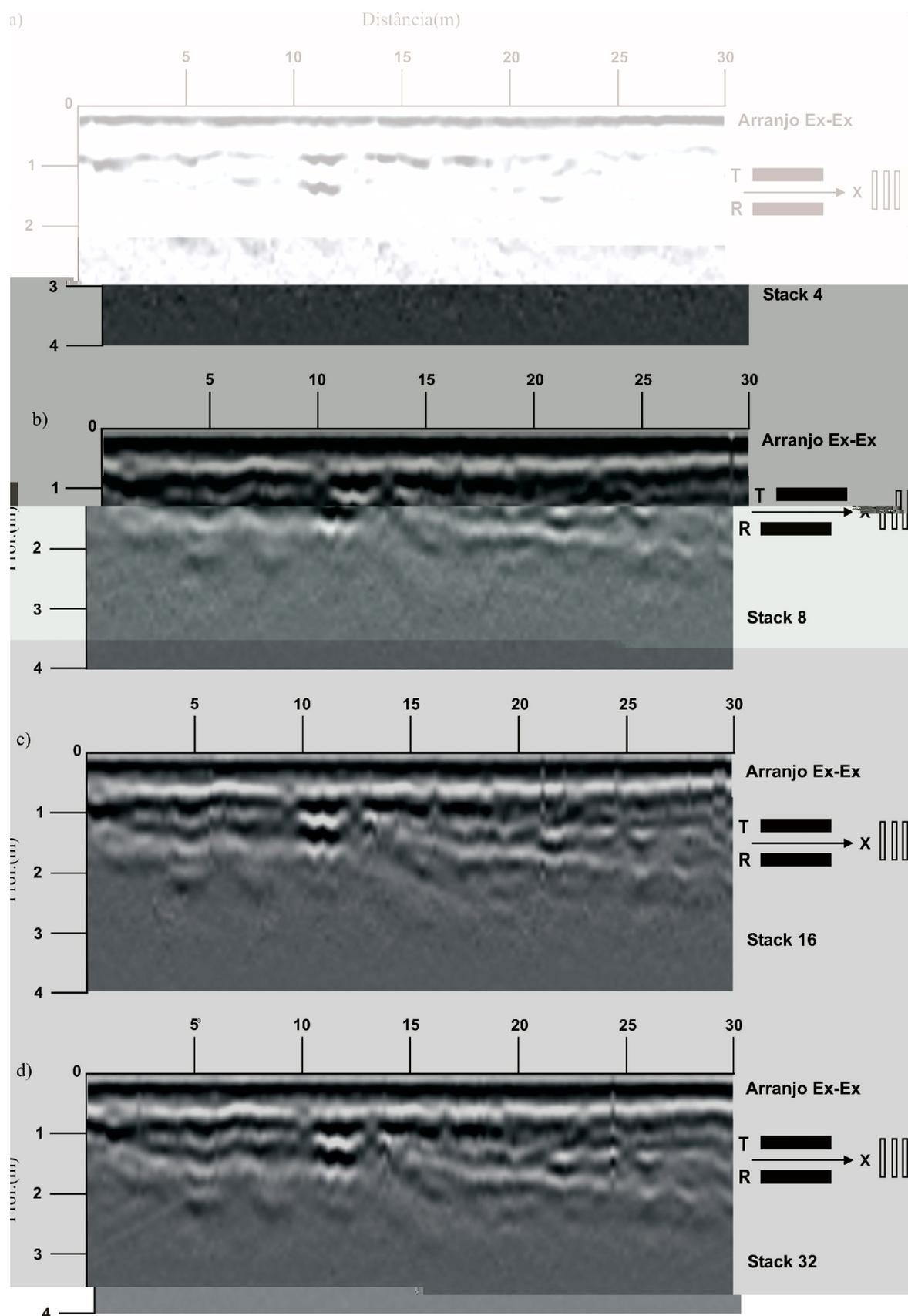


Figura 5.36 - Aquisições realizadas no modo passo a passo, arranjo Ex-Ex, frequência de 100MHz e espaçamento entre traços igual a 0,2m. a) stack 4, b) stack 8, c) stack 16 e d) stack 32.

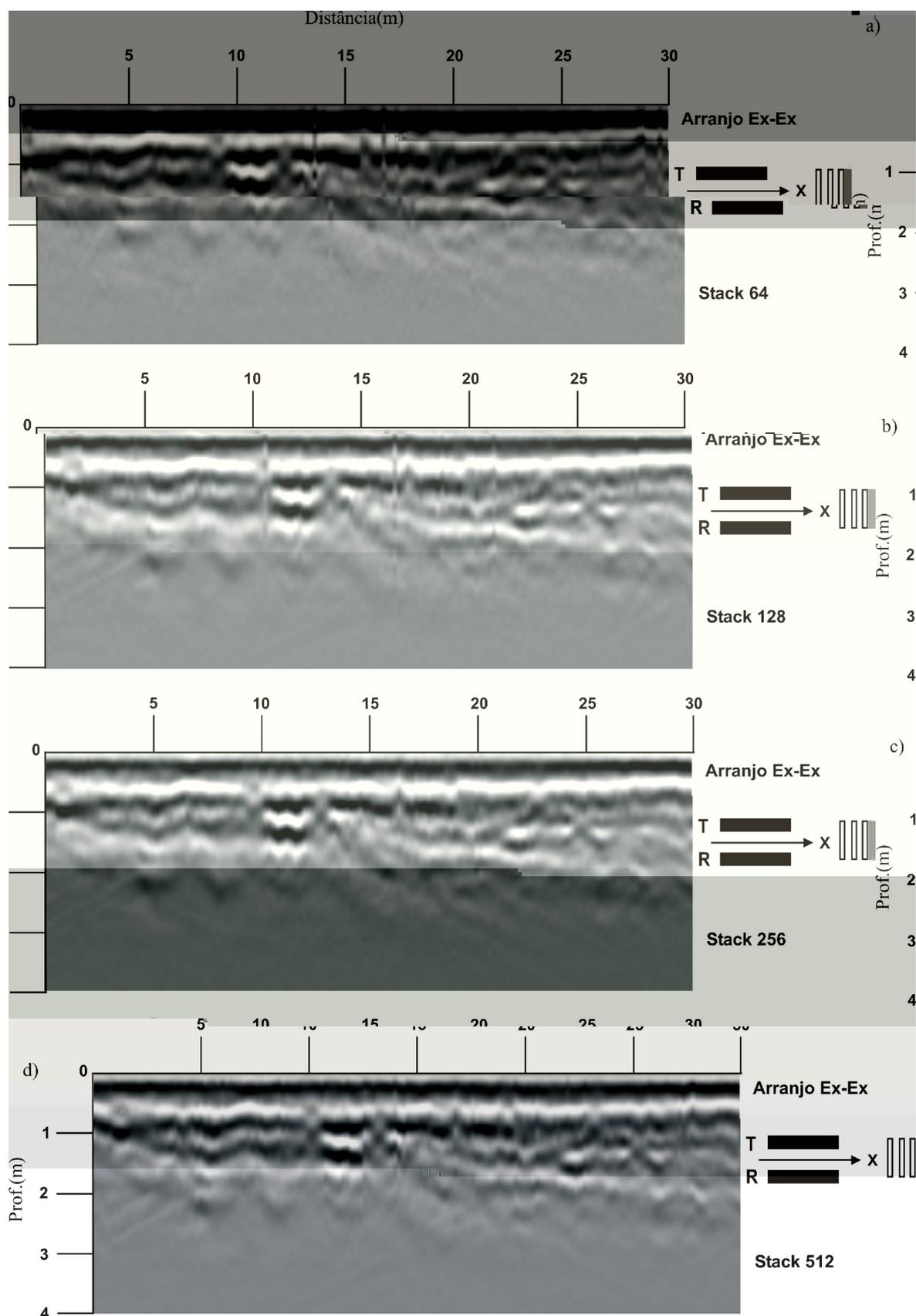


Figura 5.37 - Aquisições realizadas no modo passo a passo, arranjo Ex-Ex, frequência de 100MHz e espaçamento entre traços igual a 0,2m. a) stack 64, b) stack 128, c) stack 256 e d) stack 512

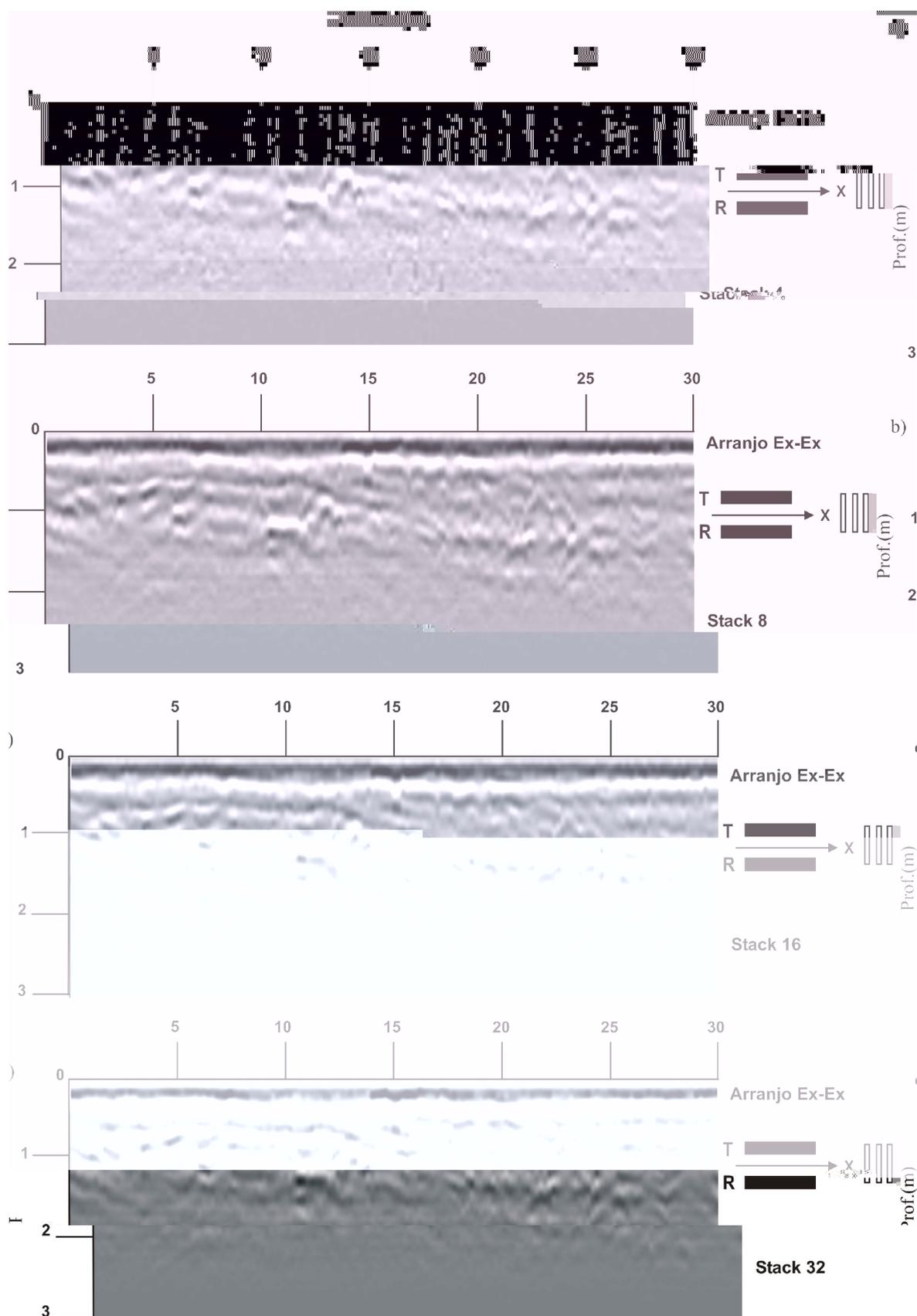


Figura 5.38 - Aquisições realizadas no modo passo a passo, arranjo Ex-Ex, frequência de 200MHz e espaçamento entre traços igual a 0,2m. a) stack 4, b) stack 8, c) stack 16 e d) stack 32

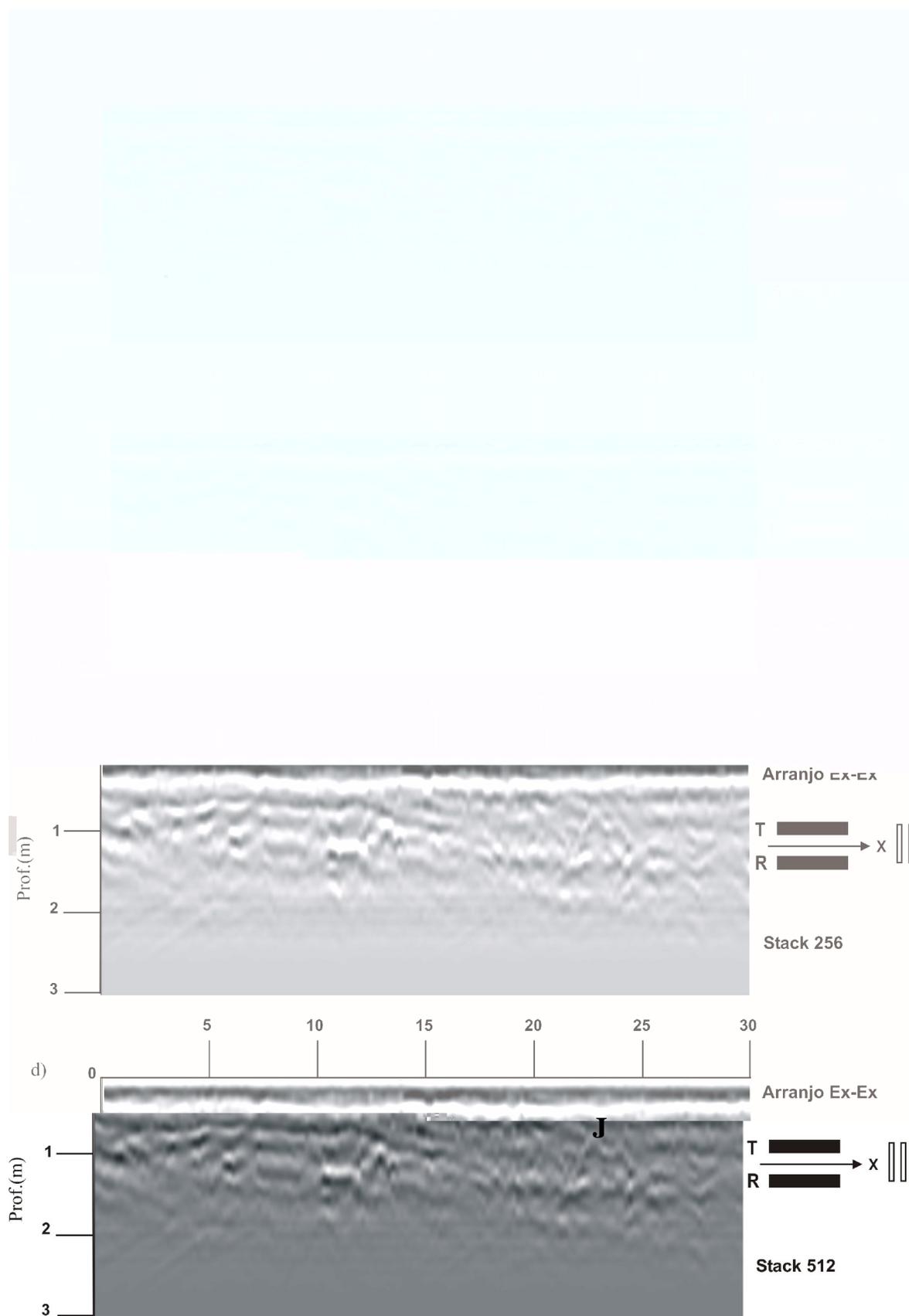


Figura 5.39 - Aquisições realizadas no modo passo a passo, arranjo Ex-Ex, frequência de 200MHz e espaçamento entre traços igual a 0,2m. a) stack 64, b) stack 128, c) stack 256 e d) stack 512.

De uma maneira geral, as antenas de 200 MHz geraram refletores melhores do que as antenas de 100MHz, pois permitiram imagear alguns dos tubos de pvc instalados no SCGR, mostrando, assim, concordância com os resultados mostrados no trabalho de Robert; Daniels (1996).

A dificuldade de detecção dos tubos de pvc está relacionada com o baixo contraste entre as propriedades elétricas dos alvos e do background, aliados, a elevada condutividade do aterro usado para cobrir os alvos. Vale ressaltar que nesta pesquisa foi utilizado o equipamento sueco (Ramac/Mala), e que segundo dados reais obtidos durante atividades práticas de campo, apresenta menos potência quando comparado com o equipamento da empresa americana (GSSI). Neste caso, seria bastante interessante numa etapa posterior a esta pesquisa, que se fizessem novas medidas GPR sobre estes alvos e que a eficiência dos equipamentos pudesse ser comparada.

Por fim, comparando-se os resultados reais com as modelagens feitas pelo software Reflexw, apresentadas no capítulo 4, nota-se que houve boa concordância para os alvos rasos (0,5m), ou seja, ambos os detectaram, no entanto, nos dados reais não foi possível visualizar a inversão de polaridade apresentada na modelagem feita com arranjo Ex-Ex, frequência de 200MHz e espaçamento de 0,01m, a qual conseguiu distinguir os três tipos de alvos, através de refletores distintos. Nos dados reais a aquisição com esse arranjo utilizando um pequeno espaçamento não foi possível, pois esse arranjo de antenas (Ex-Ex) não pode ser adaptada no sistema “trenó”, como já dito.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Nesta pesquisa foram testados vários parâmetros de campo sobre as linhas de manilhas de concreto e tubulações de PVC instaladas no SCGR do IAG/USP, visando obter imagens ótimas desses alvos e assim permitir obter os melhores parâmetros de campo. Para isso, vários parâmetros de campo foram testados, tais como, modos de aquisição, passo a passo e contínuo, antenas não blindadas com frequências de 100MHz e 200MHz, polarização das antenas (Ey-Ey e Ex-Ex), espaçamento entre os traços (0,2, 0,1 e 0,05 m) e stack dos traços (4, 8, 16, 32, 64, 128, 256 e 512). Os estudos de campo foram precedidos por estudos de modelagem numérica bidimensional, os quais permitiram definir os melhores parâmetros de campo e os resultados obtidos puderam ser comparados com os dados reais.

Para a linha de manilhas de concreto as aquisições passo a passo se mostraram melhores, pois o arranjo de antenas Ex-Ex só pode ser aplicado neste tipo de aquisição. No entanto, é notado que o modo de aquisição contínuo apresentou características importantes, pois neste puderam ser utilizados pequenos valores de espaçamentos entre traços, os quais proporcionaram maior resolução espacial dos alvos, e também pequenos valores de stacks, os quais, aumentaram a velocidade da aquisição dos dados. Enquanto, que no modo de aquisição passo a passo o aumento da razão sinal/ruído é possibilitado, através do aumento do stack,

porém não é permitida a diminuição do espaçamento entre traços, devido ao tempo excessivo na aquisição dos dados.

Para a linha de manilhas de concreto o arranjo Ex-Ex apresentou maior eficiência do que o arranjo de antenas Ey-Ey, independentemente das frequências utilizadas, ou seja, todos os alvos foram identificados, devido ao fato desse arranjo de antenas ter apresentado a melhor combinação entre as polarizações das antenas transmissora e receptora e a disposição do alvo. Já para o arranjo de antenas Ey-Ey essa combinação não obteve a mesma qualidade de respostas, pois esse arranjo não identificou todos os alvos e não apresentou valores de amplitudes iguais ao Ex-Ex.

Com relação às frequências utilizadas, a frequência de 100MHz apresentou melhor desempenho, ou seja, todos os alvos foram visualizados. Já a frequência de 200MHz não obteve os mesmos resultados da antena de 100MHz, pois não conseguiu detectar os alvos mais profundos com igual eficiência, apesar de proporcionar maior resolução vertical dos alvos.

O aumento de stacks mostrou importante função, pois proporcionou melhor visualização dos alvos, principalmente ao longo da profundidade, devido ao aumento da relação sinal/ruído, fazendo com que os alvos mais profundos fossem visualizados com maior nitidez.

Por fim, os resultados dos dados reais apresentaram boa concordância com os resultados das modelagens 2D, no que diz respeito ao arranjo de antenas Ex-Ex e frequência de 100MHz, mas não no modo de aquisição, pois na modelagem 2D o espaçamento entre traços ótimo foi de 0,01m e nos dados reais não foi possível a aquisição no modo contínuo com o arranjo de antenas Ex-Ex, devido à impossibilidade de acoplamento ao sistema “trenó”.

Mediante esses resultados, pode-se dizer, que para a linha de manilhas de concreto, todos os alvos foram identificados com sucesso e os melhores refletores foram obtidos,

através dos seguintes parâmetros ótimos, modo de aquisição passo a passo, polarização de antenas Ex-Ex, frequência de 100MHz, espaçamento entre traços de 0,2m e stack 512.

Para a linha de tubulação de pvc, as aquisições no modo contínuo se mostraram melhores do que as do modo passo a passo, pois foi possível a aplicação de menores espaçamentos entre traços, proporcionando, assim maior resolução espacial dos alvos e maior velocidade de aquisição, devido aos pequenos valores de stacks. Apesar, do modo passo a passo possibilitar levantamentos com altos valores de stacks, onde os alvos mais profundos possuem mais chances de serem visualizados, isso não fez com que esse modo de aquisição de dados tivesse desempenho superior ao modo contínuo, pois nenhum alvo abaixo de 1m de profundidade foi detectado.

Com relação às frequências utilizadas foi notado que, seus desempenhos estiveram intimamente ligados aos arranjos de antenas (polarizações) empregados, ou seja, para as aquisições realizadas com os arranjos Ey-Ey e Ex-Ex, ambos, com frequência de 100MHz, nenhum refletor foi encontrado, além do cano metálico guia encontrado com a polarização Ey-Ey. Entretanto, houve nítida diferença no padrão dos refletores para as aquisições realizadas com frequência de 200MHz e arranjos de antenas Ex-Ex e Ey-Ey, pois, nestas aquisições o arranjo Ey-Ey detectou os três alvos mais rasos, A (preenchido por água), I (preenchido por água e ar) e J (vazio) contra um único alvo detectado no modo Ex-Ex, o alvo J (vazio).

Os dados reais apresentaram boa concordância com os dados de modelagens 2D, apenas para os alvos mais rasos, sendo que os melhores resultados obtidos nas modelagens foram, através dos parâmetros, arranjo de antenas Ex-Ex, frequência de 200MHz e espaçamento entre traços de 0,01m e os melhores resultados obtidos nos dados reais foram com modo de aquisição contínuo, arranjo de antenas Ey-Ey, frequência de 200MHz, e espaçamento entre traços de 0,05m. Estes resultados estão diferentes com relação ao arranjo

de antenas, pois na aquisição dos dados reais não foi possível empregar o arranjo de antenas Ex-Ex no modo contínuo, devido à impossibilidades de acoplamento desse arranjo de antenas ao sistema de aquisição “trenó”. A não detecção dos demais alvos nas aquisições reais se deve a alguns fatores, como, baixo contraste de impedâncias entre o background e os tubos de pvc, pequeno diâmetro das estruturas, o qual proporciona um grande espalhamento da energia fazendo com que, apenas pequena parte dessa seja captada pela antena receptora, atenuação natural da onda EM dada em função da profundidade e da condutividade elétrica do meio.

Mediante os resultados chega-se à conclusão que para a linha de tubos de pvc, poucos foram os alvos identificados, entretanto, em termos gerais, os parâmetros considerados ótimos foram, modo de aquisição contínuo, arranjo de antenas Ey-Ey, frequência de 200MHz, espaçamento entre traços de 0,05 e stack igual a 32. Cabendo a observação que para o alvo vazio J o arranjo de antenas Ex-Ex teve desempenho ligeiramente superior.

Dessa maneira, observa-se que, além dos parâmetros de aquisição muitos são os fatores que influenciam na obtenção de bons padrões de refletores, tais como:

i) Conhecimento prévio da disposição dos alvos. Este fato permite arranjar as antenas transmissora e receptora em relação à posição do eixo do alvo cilíndrico de modo a obter uma melhor combinação entre as polarizações da onda refletida e da antena receptora, o que favorece a recepção de um sinal com maior banda de espalhamento.

ii) Diâmetro do alvo. Quanto menor o diâmetro do alvo estudado menor será a possibilidade de detectá-lo, uma vez que o fenômeno de perda por espalhamento é maior em alvos de pequeno diâmetro, por isso sua detecção se torna muito dependente da polarização da onda EM empregada.

iii) Profundidade do alvo. Alvos mais profundos são mais difíceis de serem detectados, devido à atenuação intrínseca do sinal eletromagnético no meio.

iv) Composição do alvo. Alvos cilíndricos, de material dielétrico e condutor, se comportam de maneiras diferentes durante a interação com o campo eletromagnético.

v) *Background* do terreno. A composição do material em que o alvo está inserido influi diretamente na sua detecção, pois contribui com o maior ou menor contraste de impedância.

Os resultados obtidos para ambas as linhas instaladas na área do SCGR do IAG-USP podem servir de referência para outros levantamentos GPR em áreas onde não existam informações da subsuperfície. Contudo, recomenda-se que as aquisições nesses locais sejam realizadas com ambos arranjos de antenas, uma vez que, suas respostas se mostraram complementares.

Para finalizar, os resultados apresentados mostraram que os efeitos das polarizações são bastante complexos, e para uma melhor compreensão dos fenômenos eletromagnéticos que ocorrem sobre os alvos, mais estudos são necessários. Seria interessante também que fossem realizados estudos posteriores na área do SCGR, através de levantamentos GPR com diferentes equipamentos, para fins comparativos, pois resultados preliminares mostraram que as tubulações de PVC podem ser melhores identificadas com um equipamento do que com o outro.

REFERÊNCIAS

ANNAN, A. P. Radio interferometry depth sounding: Part 1- theoretical discussion. *Geophysics*, v.38, nº 3, p. 557-580, 1973.

ANNAN, A. P.; WALLER, W. M.; STRANGWAY, D. W.; ROSSITER, J. R.; REDMAN, J. D.; WATTS, R. D. The electromagnetic response of a low loss, 2-layer, dielectric earth for horizontal electric dipole excitation. *Geophysics*, v. 40, nº 2, p. 285-298, 1975.

ANNAN, A. P. Ground penetration radar workshop notes. *Sensors & Software, Inc.*, Internal Report, p. 130, 1992.

BALANIS, C. A. *Advanced engineering electromagnetics*. New York, NY: John Wiley & Sons, Inc, 1989.

BORGES, W.R. Investigações geofísicas na borda da Bacia Sedimentar de São Paulo, utilizando-se GPR e Eletrorresistividade. Dissertação de Mestrado, IAG/USP. São Paulo, 153p. , 2002.

BOWDERS J.J.; KOERNER, R.M.; LORD, A.E. Buried container detection using ground-probing radar. *Journal of Hazardous Materials*, v.7, nº. 1, p. 1-17, 1982.

DANIELS, D.J. *Surface penetrating radar*. The Institution of Electrical Engineers, London, United Kingdom, 300p., 1996.

DANIELS, J. J. Fundamentals of ground penetrating radar. *In: Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems*, 2, 1989, Golden. *Proceedings...*, Golden: SAGEEP'89, p.62 -142, 1989.

DANIELS, J.J.; ROBERTS, R.; VENDL, M. Ground penetration radar for the detection of liquids contaminants. *Journal of Applied Geophysics*, v.33, nº 1-3, p. 195-207, 1994.

DAVIS, J.L.; ANNAN, A.P. Ground penetrating radar for high resolution mapping of soil and rock stratigraphy. *Geophysical Prospecting*, v.37, p.531-551, 1989.

GRANDJEAN, G.; GOURRY, J.C.; BITRI, A. Evaluation of GPR techniques for civil-engineering applications: study on a test site. *Journal of Applied Geophysics*, v. 45, nº 3, p. 141-156, 2000.

IRITANI, M.A. Potencial hidrogeológico da Cidade Universitária de São Paulo. Dissertação de Mestrado, IG/USP. São Paulo. 97p., 1993.

JOL, H. M.; SMITH, D. G. Ground penetrating radar: antenna frequencies and maximum probable depths of penetration in Quaternary sediments. *Journal of Applied Geophysics*, v.33, nº 1-3, p. 93-100, 1995.

KELLER, G.V. Rock and mineral properties. *Investigations in Geophysics*, n° 3. Electromagnetic Methods in Applied Geophysics. Society of Exploration Geophysicists, Ed. Misac N. Nabighian, v.1, p.13-51, 1987.

LIMA, C. B. Análise de dispositivos eletromagnéticos para hipertemia usando o método FDTD. Tese de Doutorado, PEEL/UFSC. Santa Catarina, 2006.

LORD Jr., A.E.; KOERNER, R.M. Nondestructive testing (NDT) techniques to detect contained subsurface hazardous waste. *Journal of Hazardous Materials*, v.19, nº1, p. 119-123, 1988.

LUTZ, P.; PERROUD, H.; GARAMBOIS, S. Influence of antenna configurations on 2D GPR data: Information from polarization and amplitude measurement. Proceedings Ninth International Conference on Ground Penetrating Radar, Santa Barbara USA, p. 454-459, 2002.

LUZITANO, R.D.; ULRYCH, T. J. The value of two component GPR Data: Identifying the polarization contribution in amplitude anomalies. SAGEEP '96, p. 1179-1187, 1996.

MARCELINO, M.B. Delimitação de Perímetros de Proteção dos Poços tubulares (PPP) empregando a técnica de modelagem numérica tridimensional. Dissertação de Mestrado. IGc/USP. São Paulo. 122p., 1999.

MOREY, R. M. Continuous subsurface profiling by impulse radar. In: Engineering Foundation Conference on Subsurface Exploration for Underground Excavation and Heavy Construction, Henniker. Proceedings..., Henniker: American Society of Civil Engineers, p.213-232, 1974.

OLHOEFT, G. R. *Electrical properties of rocks*, in *Physical Properties of Rocks and Minerals*, in Touloukian, Y. S., Judd, W. R., and Roy, R. F., eds.: New York, McGraw-Hill, p. 257-330, 1981.

OLHOEFT, G.R.; POWERS, M. H.; CAPRON, D. E. Buried object detection with Ground Penetrating Radar: in Proc. Of Unexploded Ordnance (UXO) detection and range remediation conference, Golden, CO, May 17-19, p. 207-233, 1994.

OLHOEFT, G. R. Electrical, Magnetic, and Geometric Properties that determine Ground Penetrating Radar Performance. *IN: 6th International Conference on Ground Penetrating Radar*, Tohoku University, Sendai, Japan, CD-Room , 1996.

PORSANI, J. L. & RODRIGUES, A. R. O método GPR aplicado à caracterização de reservatórios: um exemplo na Bacia Potiguar - RN. *In: QUARTO CONGRESSO INTERNACIONAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE GEOFÍSICA*, 1995, Rio de Janeiro. *Resumos Expandidos...*, Rio de Janeiro: SBGf, v.2, p. 843 - 845 , 1995.

PORSANI, J. L. Caracterização geofísica de alvos rasos com aplicações no planejamento urbano, meio ambiente e arqueologia: estudo sobre o Sítio Controlado do IAG/USP. Projeto de Pesquisa. Processo FAPESP No. 02/07509-1, São Paulo - SP, 2002.

PORSANI, J. L.; BORGES, W.R.; ELIS, V.R.; DIOGO, L.A.; HODO, F.Y.; MARRANO, A.; BIRELLI, C.A. Investigações geofísicas de superfície e de poço no sítio controlado de geofísica rasa do IAG-USP. *Revista Brasileira de Geofísica*, 2004.

PORSANI, J. L.; SAUCK, William A; SOUZA JÚNIOR, Abad Oliveira. GPR for Mapping Fractures and as a Guide for the Extraction of Ornamental Granite from a Quarry: a Case Study from Southern Brazil. *Journal of Applied Geophysics*, Holanda, v. 58, n. 3, p. 177-187, 2006.

POWERS, M. H. Modeling frequency dependent GPR. *The leading Edge*, v.16, nº 11, p. 1657-1662, 1997.

RADZEVICIUS, S.J.; DANIELS, J.J. Ground penetrating radar polarization and scattering from cylinders. *Journal of Applied Geophysics*, v.45, p. 111-125, 2000.

RADZEVICIUS, S.J. Dipole antenna properties and their effects on ground penetrating radar data. PhD Dissertation, The Ohio State University, USA, 2001.

REYNOLDS, J.M. An introduction to applied and environmental geophysics. JohnWiley & Sons Ltd., Baffins Lane, Chichester. West Sussex P019 1UD, Englad, p. 681-749, 1997.

ROBERTS, R. L.; DANIELS, J. J. Analysis of GPR polarization phenomena. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, v. 1 nº 2, p. 139-157, 1996.

SANDMEIER, K.J. ReflexW Version 4.0. Program for processing of seismic, acoustic or electromagnetic reflection, refraction and transmission data. Manual do Software. Karlsruhe, Germany, 345p, 2004.

SMITH, G. S. Directive properties of antennas for transmission into a material half-space. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation AP*, v. 32, n° 3, p. 232-246, 1984.

STRATTON, J. A. *Electromagnetic Theory*. McGraw Hill, p. 558-561, 1941.

TAFLOVE, A. Application of the Finite-Difference Time-Domain Method to Sinusoidal Steady-State Electromagnetic-Penetration Problems. *IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility*, v. 22, n° 3, p. 191-202, 1980.

TAFLOVE, A.; UMASHANKAR, K. R. The finite difference time domain (fdtd) method for numerical modeling of electromagnetic scattering. *IEEE Transaction Magnetics*, v. 25, n° 4, p. 3086-3091, 1989.

TRAVASSOS, J. M.; MENEZES, P. T. L. GPR exploration for groundwater in a crystalline rock terrain. *Journal of Applied Geophysics*, v. 55, n° 3-4, p. 239-248, 2004.

VERSTEEG, R. Optimization of GPR acquisition and noise elimination parameters. Proceedings 6th International Conference on Ground Penetrating Radar, Sendai Japan, p. 289-292, 1996.

WEXLER, A. Computation of electromagnetic fields. *IEEE Transaction Microwave Theory and Techniques*, v. 17, n° 8, p. 416-439, 1969.

YEE, K. S. Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation AP*, v.14, n° 3, p. 302-307, 1966.

YILMAZ, O. *Seismic Data Processing*. Tulsa: Society of Exploration Geophysics Press, 526p., 1987.

ZEBKER, H. A.; VAN ZYL, J. J.; HELD, D. N.. Imaging radar polarimetry from wave synthesis. *Journal of Geophysical Research*, v.92, n° B1, p. 683-701, 1987.

ZENG, X.; MCMECHAN, G.A. GPR characterization of buried tanks and pipes. *Geophysics*, v. 62, n° 3, p. 797-806, 1997.

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)