



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
CENTRO DE CIÊNCIAS MATEMÁTICAS E DA NATUREZA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

LEVANTAMENTO GEOFÍSICO COM RADAR DE PENETRAÇÃO NO SOLO (GPR)
VISANDO CARACTERIZAÇÃO ESTRUTURAL DE UM AFLORAMENTO NA BACIA
DE RESENDE -RJ

LUIZA HELENA DE OLIVEIRA RODRIGUES

MONOGRAFIA SUBMETIDA AO CURSO DE GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO, COMO REQUISITO
OBRIGATÓRIO DA DISCIPLINA “ESTÁGIO DE CAMPO IV”.

*TEMA VINCULADO AO PROGRAMA DE CAPACITAÇÃO DE RECURSOS HUMANOS EM
GEOLOGIA DO PETRÓLEO (CONVÊNIO PRH-ANP/MCT Nº 18)*

RIO DE JANEIRO – RJ – BRASIL
SETEMBRO DE 2004.

LEVANTAMENTO GEOFÍSICO COM RADAR DE PENETRAÇÃO NO SOLO (GPR)
VISANDO CARACTERIZAÇÃO ESTRUTURAL EM UM AFLORAMENTO NA BACIA
DE RESENDE-RJ

LUIZA HELENA DE OLIVEIRA RODRIGUES

MONOGRAFIA SUBMETIDA AO CURSO DE GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO, COMO REQUISITO
OBRIGATÓRIO DA DISCIPLINA “ESTÁGIO DE CAMPO – IV”.

SETOR: GEOFÍSICA.

ORIENTADORA: PROF^A. DR^A. PAULA LÚCIA FERRUCIO DA ROCHA.

APROVADA POR:

Prof^a. Dra. Paula Lúcia Ferrúcio da Rocha, UFRJ.

Prof. Dr. Claudio Bettini, UFRJ.

Prof. M. Sc. José Agnelo Soares, UFRJ.

FICHA CATALOGRÁFICA

Rodrigues, Luisa Helena Oliveira de.

Levantamento geofísico com radar de penetração no solo (GPR) visando caracterização estrutural em um afloramento na Bacia de Resende-RJ / Luisa Helena de Oliveira Rodrigues. – Rio de Janeiro, 2004.

xii, 54, f.: il., anexo I (22)

Monografia (Bacharelado em Geologia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, Instituto de Geociências – Departamento de Geologia, 2004.

Orientadora: Prof^a. Dra. Paula Lúcia. F. da Rocha.

1. GPR. 2. Levantamento Geofísico. 3. Bacia de Resende.

- Monografia. I. Rocha, Paula L. F. (Orient.)

II. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Instituto de Geociências. Departamento de Geologia. II Título.

Dedico este trabalho aos meus pais, Maria Ilídia e Raimundo, por todo o aprendizado que me deram e por serem os maiores incentivadores para minha realização pessoal e profissional.

Também dedico ao meu filho, Pedro Luís, que me acompanhou, até mesmo antes de nascer, em todo o andamento deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar quero agradecer a Camila, Gleide e Ana Santana, amigas que foram essenciais para a realização deste trabalho.

Agradeço ao PRH-ANP/18, Programa de Capacitação de Recursos Humanos em Geologia do Petróleo (convênio prh-anp/mct nº 18) pelo financiamento deste trabalho.

Ao PRH-ANP-8, Programa de Pós-Graduação e Graduação em Geofísica e Geologia para o Setor Petróleo e Gás, (convênio prh-anp/mct nº 8) da UFBA, coordenado pelo professor Hédison Kiuity Sato, pelo convênio para a realização da segunda parte deste trabalho.

Aos professores Claudio Bettini e Leonardo Borghi, por acreditarem em meu trabalho e me oferecerem a oportunidade de me inserir neste programa.

Agradeço a minha orientadora professora Paula Ferrúcio.

Ao colaborador professor Marco Antônio Botelho.

Ao Laboratório de Geofísica do CPGG/UFBA coordenado pelo prof. Olivar A L. Lima, pela infra-estrutura oferecida.

Aos amigos de trabalho: Zaque, Viviane, Luciano e Marta (UFRJ) e Ordilei e Tiago (UFBA).

A Ana Paula, pela ajuda na pesquisa bibliográfica.

Ao motorista, amigo e colaborador, Luciano.

A minha família, meus pais Raimundo e Maria Ilídia e minhas irmãs Débora e Denise.

Ao meu marido Samuel, pelo carinho e pela grande participação em diversas etapas na confecção deste trabalho.

Aos amigos Thaisinha, André, Mônica, Alba, Mário e Felipe Medeiros por terem me acompanhado durante toda a graduação.

Aos professores, pelo ensinamento de Geologia, ciência tão plena e ao mesmo tempo tão rica e enigmática.

Agradeço, finalmente, ao objeto de estudo em questão, ao planeta Terra, pelas diversas riquezas que ele nos oferece para nosso sustento e pela sua beleza unânime e harmoniosa.

RESUMO DA MONOGRAFIA SUBMETIDA AO CURSO DE GRADUAÇÃO EM
GEOLOGIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO, COMO
REQUISITO OBRIGATÓRIO DA DISCIPLINA “ESTÁGIO DE CAMPO – IV”.

LEVANTAMENTO GEOFÍSICO COM RADAR DE PENETRAÇÃO NO SOLO (GPR)
VISANDO CARACTERIZAÇÃO ESTRUTURAL EM UM AFLORAMENTO NA BACIA
DE RESENDE-RJ

LUIZA HELENA DE OLIVEIRA RODRIGUES

RIO DE JANEIRO, SETEMBRO DE 2004.

ORIENTADOR: PAULA LÚCIA FERRUCIO DA ROCHA.

SETOR: GEOFÍSICA.

Apresenta-se neste trabalho um estudo utilizando o Radar de Penetração no Solo (GPR) como ferramenta para determinação de estruturas em um afloramento de estrada. Visa-se obter imagens que sejam capazes de mostrar falhas presentes nesse afloramento. O levantamento foi realizado na Bacia de Resende (Rio de Janeiro), e o processamento de dados foi realizado em duas instituições de ensino, UFRJ e UFBA, através de um intercâmbio entre o prh-anp/mct nº 18, Programa de Recursos Humanos/ANP, da UFRJ, coordenado pelo professor Leonardo Borghi, e o prh-anp/mct nº 8, Programa de Pós-Graduação e Graduação em Geofísica e Geologia para o Setor Petróleo e Gás, da UFBA, coordenado pelo professor Hédison Kiuity Sato. A Bacia de Resende é uma depressão alongada em E - NE situada no extremo Sudeste do Estado do Rio de Janeiro. Para a aquisição desses dados utilizou-se o equipamento Pulse Ekko IV com antena de 50 MHz e *off-set* inicial entre as antenas (transmissora e receptora) de um metro. Os dados obtidos neste afloramento foram processados com o *software* GRADIX® V1 da Interpex. Inc.®. Na etapa do processamento foram aplicados principalmente os filtros convencionais tais como: gaussiano, passa-banda do tipo *Butterworth* e a ferramenta *Trace Mix*, além de outros. Foi feita também a análise de velocidade para conversão tempo-profundidade.

ABSTRACT OF THE MONOGRAPH PRESENTED TO THE UNDERGRADUATE
COURSE OF GEOLOGY OF THE FEDERAL UNIVERSITY OF RIO DE JANEIRO
AS OBLIGATORY FULFILLMENT OF THE REQUIREMENTS OF THE DISCIPLINE
“ESTÁGIO DE CAMPO IV”

GEOPHYSICAL SURVEY USING GPR (GROUND PENETRATING RADAR) AIMING
AT STRUCTURAL CHARACTERIZATION AT AN OUTCROP IN RESENDE BASIN

LUISA HELENA DE OLIVEIRA RODRIGUES

RIO DE JANEIRO, SEPTEMBER , 2004.

SUPERVISOR: PAULA LÚCIA FERRUCIO DA ROCHA.

SECTOR: GEOPHYSICS.

This report deals with the Ground Penetrating Radar (GPR) as a tool to identify structural features in outcrops. The report aims at obtaining images capable of indicating such features. The study was focused on the Resende Basin and the data were processed in two Universities (UFRJ e UFBA) linked by the prh-anp/mct n° 18, “Programa de Recursos Humanos/ANP” at the UFRJ, coordinated by prof. Leonardo Borghi, and the prh-anp/mcp n° 8, “Programa de Pós-Graduação e Graduação em Geofísica e Geologia para o Setor Petróleo e Gás”, coordinated by prof Hédison Kiuity Sato. The Resende Basin is a stretched depression with direction E-NE, situated in the extreme southwest of the state of Rio de Janeiro. The acquisition of the data was done using the Pulse Ekko IV equipment with a 50 MHz antenna and one meter offset. The data obtained in this outcrop were processed with the software GRADIX® v1- Interpex Inc®. The main filters used were Gaussian, buterworth band pass and trace mix, among others. Velocity analysis was done in order to do time to depth data conversion.

SUMÁRIO

1	Introdução	1
2	Objetivo	3
3	GPR	4
3.1	Vantagens e aplicações do GPR	10
4	Área de estudo	12
4.1	Localização	12
4.2	Aspectos Fisiográficos	13
4.2.1	Clima e Vegetação.....	13
4.2.2	Geomorfologia	14
4.2.3	Contexto geológico regional	15
4.4	Estratigrafia	17
4.5	Arcabouço Estrutural.....	19
5	Metodologia.....	20
5.1	Aquisição	20
5.2	Processamento	24
5.2.1	Treinamento realizado na UFRJ	25
5.2.1	Processamento realizado na UFBA	32
6	Resultados	40
6.1	Análise de Velocidade.....	41
6.2	Interpretação	43
7	Conclusão	51
8	referência bibliográfica	52
	Anexo I – SEÇÕES	I

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Arranjo de reflexão, um dos diversos modos de aquisição de dados (Annan, 1992).	7
Figura 2: Arranjo CMP, um dos modos de aquisição de dados que possibilita estimar a velocidade de propagação da onda eletromagnética no meio (Annan, 1992)...8	8
Figura 3: Arranjo transiluminação (Annan, 1992).	9
Figura 4: Mapa de localização da Bacia de Resende (modificado de Castro,2000) .	12
Figura 5: Estruturação regional do Rifte Continental do Sudeste do Brasil (modificado de Melo et al., 1985b, cedido por Albuquerque, 2001).	16
Figura 6: Afloramento estudado, localizado próximo à rádio Agulhas Negras.	20
Figura 7: Modelo estrutural de afloramento na Bacia de Resende. (Ramos, 2002). .	21
Figura 8: Desenho esquemático do levantamento com GPR realizado no Afloramento da Rádio Agulhas Negras, Bacia de Resende.	23
Figura 9: Import – A Figura mostra a visualização dos dados como foram adquiridos em campo.	26
Figura 10: Mostra a aplicação da ferramenta Trace Windowing no perfil apresentado na Figura 9. Observa-se que esta seção está invertida com relação ao eixo X.	27
Figura 11: Mostra a utilização da ferramenta Set time zero no perfil apresentado na Figura 10. Pode-se observar na seção que o tempo zero foi ajustado para o início do primeiro refletor.	28
Figura 12: Mostra a aplicação do Filtro Passabanda do tipo Butterworth no perfil apresentado na Figura 11 .O ressalte dos refletores é decorrente da retirada das frequências indesejadas.....	29
Figura 13: Mostra a aplicação do filtro gaussiano na seção apresentada na Figura 12. Observa-se que a retirada das baixas frequências melhorou a visualização dos refletores presentes no perfil.	30
Figura 14: Mostra a aplicação da ferramenta trace mix no perfil apresentado na Figura 13. Nesta Figura pode-se observar a suavização dos refletores no perfil.	31
Figura 15: Etapa 1(Import) – Mostra os dados como foram adquiridos no campo - seção sem processamento.	33
Figura 16: Etapa 2 (Set time zero). E mostrado o efeito sobre a seção da Figura 15. Pode-se observar que os refletores começam no tempo zero.	34

Figura 17: Etapa 3 (Trace Windowing) – Mostra a seção invertida em relação a seção da Figura 16 e o efeito da aplicação do start time que retirou a faixa em cinza da seção anterior.	35
Figura 18: Etapa 4 (Filtro Passabanda Butterworth) – após a aplicação deste filtro pode-se observar melhor definição dos refletores.	36
Figura 19: Etapa 5 (Filtro Gaussiano) – Pode-se observar que com a aplicação deste filtro foram retiradas manchas possivelmente causadas pelas frequências mais baixas do dado.	37
Figura 20: Etapa 6 (Filtro Gaussiano)- Pode-se observar a melhora na visualização desta seção em relação à seção anterior (Figura 19) com a retirada de manchas provenientes de baixas frequências.	38
Figura 21: Etapa 7 (Trace Mix) - Pode-se observar a suavização do dado processado em relação à seção da Figura 20. A aplicação desta ferramenta forneceu uma maior continuidade dos refletores.	39
Figura 22: Mostra a Seção 5 convertida de tempo para profundidade.	42
Figura 23: Seção 1 processada sem interpretação.	44
Figura 24: Seção 1 processada com interpretação.	44
Figura 25: Seção 5 processada sem interpretação.	45
Figura 26: Seção 5 processada com interpretação.	45
Figura 27: Seção 10 processada sem interpretação.	46
Figura 28: Seção 10 processada com interpretação.	46
Figura 29: Seção 15 processada sem interpretação.	47
Figura 30: Seção 15 processada com interpretação.	47
Figura 31: Seção 18 processada sem interpretação.	48
Figura 32: Seção 18 processada com interpretação.	48
Figura 33: Visualização das cinco linhas interpretadas colocadas em posições paralelas.	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Valores típicos dos parâmetros: constante dielétrica (K' - adimensional), condutividade elétrica (σ -mS/m), velocidade (V -m/ns) e atenuação (α - dB/m) para alguns materiais geológicos (Davis & Annan, 1989).....	6
--	---

1 INTRODUÇÃO

Este trabalho consiste na identificação de estruturas em um afloramento fluvial situado na Bacia de Resende (RJ) utilizando o método GPR (Ground Penetrating Radar). Este método tem grande eficiência para o estudo em questão, pois consta de um levantamento geofísico aplicado em geologia rasa com utilização de altas frequências, podendo, assim, ter uma imagem interna mais detalhada do afloramento.

Esse estudo segue a mesma linha de vários trabalhos publicados e que foram conduzidos pelo Centro de Pesquisas da PETROBRAS (CENPES). Eles tiveram o objetivo de demonstrar a importância diversificada do uso do GPR para estudos na área de petróleo, o que vem sendo utilizado cada vez mais devido a seu fácil manuseio e mobilidade, seu baixo custo e principalmente a sua capacidade de imagear estruturas de dimensões reduzidas devido a sua elevada frequência. Estes trabalhos foram constituídos por diversos levantamentos com GPR em áreas de diferentes províncias geológicas brasileiras, avaliando a utilização do GPR na indústria do petróleo.

Rodrigues e Porsani (1997) publicaram um trabalho utilizando o GPR procurando cobrir a maior gama possível de ambientes deposicionais que ocorrem no Brasil, como por exemplo, caracterização de estratificações e estratificações cruzadas nas dunas de Florianópolis; caracterização de estruturas turbidíticas na Bacia de Itajaí e indicação da intercalação de camadas arenosas e argilo-arenosas. Na indústria do petróleo este tipo de levantamento contribui para o estudo de análogos para ajudar no detalhamento estratigráfico complementando a modelagem de dados de subsuperfície.

Este trabalho dá continuidade aos estudos de Araújo Jr. (2003) e Dias *et al.* (2003), que realizaram levantamentos com GPR em um mesmo afloramento, porém utilizando uma malha de aquisição e processamentos diferentes dos utilizados neste estudo, além de antenas com outra frequência.

Este trabalho consiste na aquisição, processamento e interpretação dos dados adquiridos na Bacia de Resende. O processamento foi realizado em duas etapas: a primeira, realizada no Laboratório de Geofísica do Departamento de Geologia da UFRJ constou num conhecimento do *software* a fim de testar as ferramentas, a Rodrigues, L. H. O. 2004. Levantamento Geofísico com Radar de Penetração no Solo (GPR) Visando Caracterização Estrutural em um Afloramento na Bacia de Resende – RJ. UFRJ.

segunda, que constou na realização do fluxo de processamento, foi realizada no Laboratório do CPGG/UFBA (Centro de Pesquisa em Geofísica e Geologia da Universidade Federal da Bahia), coordenado pelo professor Olivar A. L. Lima, e sob colaboração do professor Marco Antônio Botelho.

2 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é obter, através do processamento dos dados adquiridos pelo método GPR, visualizações que possam indicar a localização de falhas presentes num afloramento de estrada na Bacia de Resende.

3 GPR

Os dados deste trabalho foram adquiridos através do Radar de Penetração no Solo (GPR), um método de investigação geofísica amplamente utilizado na geologia e em outras áreas, baseado na reflexão de ondas de radar nas interfaces dielétricas do solo (Duarte, 1997). Utilizam-se ondas eletromagnéticas de alta frequência (na faixa de 10-1000 MHz) através de uma antena transmissora. Parte do sinal transmitido é refletido nas interfaces de materiais com distintos valores de permissividade dielétrica (ϵ), indicando mudanças nas propriedades elétricas no meio geológico. Depois de detectado pela antena receptora, o sinal é amplificado, digitalizado, visualizado e armazenado para, numa fase posterior, ser processado através de *software* especializados.

Os dados adquiridos através desta técnica são apresentados na forma de seções. O registro é efetuado em cada ponto, movendo-se o aparelho e registrando assim vários pontos sucessivos. O registro final é obtido expondo-se graficamente os registros lado a lado e obtendo-se uma seção do subsolo (Rodrigues e Porsani, 1997). Cada posição de medida em superfície corresponde a um traço que representa o tempo duplo de percurso do sinal refletido em discontinuidades presentes no subsolo.

A profundidade de investigação depende, entre outros fatores, da frequência escolhida, e é limitada, no máximo, até 40-50 metros. Sinal de alta frequência produz alta resolução, porém baixa penetração, e o inverso ocorre para baixas frequências.

A permissividade dielétrica e a condutividade elétrica são as propriedades físicas que influenciam diretamente na propagação e na atenuação das ondas de radar. A permissividade dielétrica consiste na capacidade que um material isolante possui de armazenar cargas elétricas. Ela é expressa através de um número adimensional, a constante dielétrica (K), através da expressão:

$$\epsilon = K \cdot \epsilon_0, \text{ onde } \epsilon_0 \text{ é a permissividade dielétrica no vácuo.}$$

A intensidade da reflexão das ondas está relacionada ao contraste existente entre as constantes dielétricas de diferentes meios, de acordo com a expressão abaixo:

$$R = \frac{(K1)^{1/2} - (K2)^{1/2}}{(K1)^{1/2} + (K2)^{1/2}}, \text{ (Annan, 2000)}$$

A eficácia da técnica é limitada quando ocorre aumento da atenuação (α), como mostrada na fórmula abaixo:

$$\alpha = 1,69 \cdot \sigma / K, \text{ (Annan, 2000).}$$

A atenuação, portanto é um parâmetro que está diretamente correlacionado à condutividade (σ). Tal propriedade está relacionada com a capacidade que um determinado meio possui de conduzir corrente elétrica.

Porém, quanto maior a condutividade elétrica do terreno, mais limitada será a penetração do pulso de radar.

A Tabela 1 mostra valores típicos destes parâmetros em distintos materiais.

Tabela 1: Valores típicos dos parâmetros: constante dielétrica (K' - adimensional), condutividade elétrica (σ -mS/m), velocidade (V -m/ns) e atenuação (α - dB/m) para alguns materiais geológicos (Davis & Annan, 1989).

Material	K'	σ' (mS/m)	V (m/ns)	α (dB/m)
Ar	1	0	0.3	0
Água destilada	80	0.01	0.033	2×10^{-3}
Água doce	80	0.5	0.033	0.1
Água salgada	80	3×10^3	0.01	10^3
Areia seca	3-5	0.01	0.15	0.01
Areia saturada	20-30	0.1-1	0.06	0.03-0.3
Calcário	4-8	0.5-2	0.12	0.4-1
Folhelhos	5-15	1-100	0.09	1-100
Siltes	5-30	1-100	0.07	1-100
Argilas	5-40	2-1000	0.06	1-300
Granito	4-6	0.01-1	0.13	0.01-1
Mineral salino seco	5-6	0.01-1	0.13	0.01-1
Gelo	3-4	0.01	0.16	0.01

O fenômeno de propagação de uma onda eletromagnética é descrito através das equações de Maxwell, que constam de uma série de equações cujos parâmetros são inerentes às propriedades magnéticas e elétricas dos meios nos quais se dá a propagação. Tais equações descrevem a indução eletromagnética ocasionada por um campo elétrico no vácuo.

As relações geométricas envolvidas no fenômeno de propagação de ondas eletromagnéticas são descritas a partir da Lei de Snell. Segundo esta lei, “*uma onda incidente em uma interface que separa meios com propriedades eletromagnéticas contrastantes é parcialmente refletida e refratada*”. Esse aspecto confere certa similaridade entre o método de GPR e o sísmico, sendo que este se baseia na propagação de ondas acústicas e as propriedades envolvidas são as elásticas.

Annan (1992) descreve vários tipos de arranjo utilizados para aquisição de dados com GPR: *Common Offset*, *Common Mid Point (CMP)*, *Wide Angle Reflection and Refract (WARR)* e Transiluminação.

Através do arranjo *Common Offset* (ou Reflexão), o levantamento é realizado com o espaçamento fixo entre as antenas. O equipamento é deslocado ao longo do perfil efetuando diversas medidas, cada qual correspondendo a um traço na seção gerada (Figura 1). Este arranjo assemelha-se muito com a prospecção sísmica.

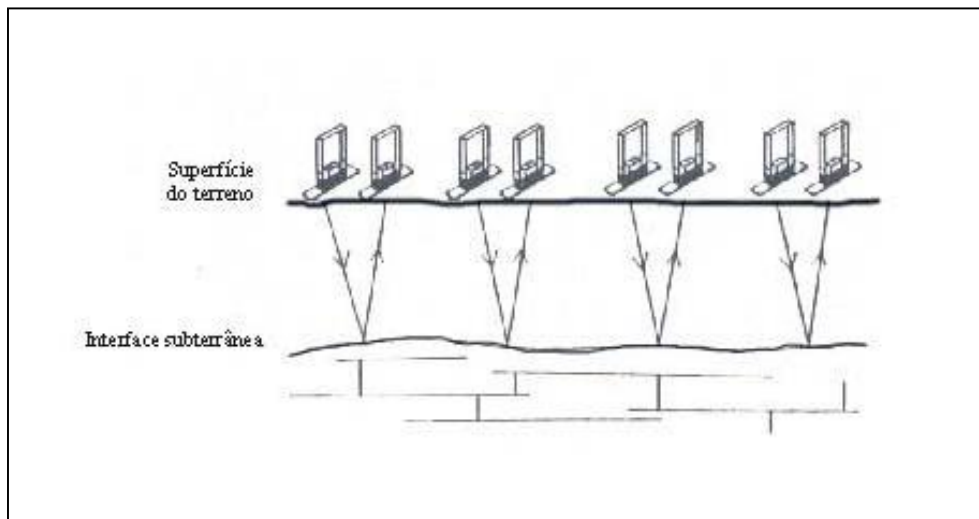


Figura 1: Arranjo de reflexão, um dos diversos modos de aquisição de dados (Annan, 1992).

Annan, acima citado, descreve os arranjos CMP e WARR como utilizados para “obter as velocidades de propagação da onda no meio em função da profundidade, por meio do progressivo aumento da distância entre a antena transmissora e a receptora”. No arranjo CMP, as antenas transmissora e receptora são deslocadas simetricamente a partir de um ponto central conforme demonstra a Figura 2. No arranjo WARR, a antena transmissora é mantida fixa e somente a receptora é deslocada ao longo do perfil.

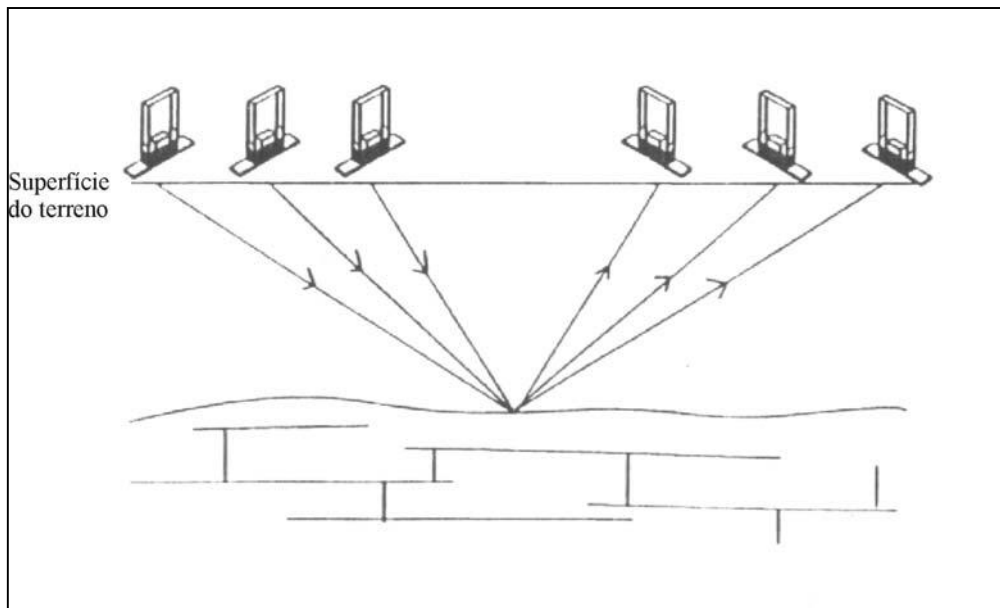


Figura 2: Arranjo CMP, um dos modos de aquisição de dados que possibilita estimar a velocidade de propagação da onda eletromagnética no meio (Annan, 1992).

Um outro arranjo descrito por Annan (1992), denominado transiluminação, é utilizado para a caracterização de feições muito pequenas, como, por exemplo, na verificação de fissuras em pilares. A antena receptora é mantida fixa enquanto a transmissora é deslocada em posição simetricamente oposta, como mostra a Figura 3.

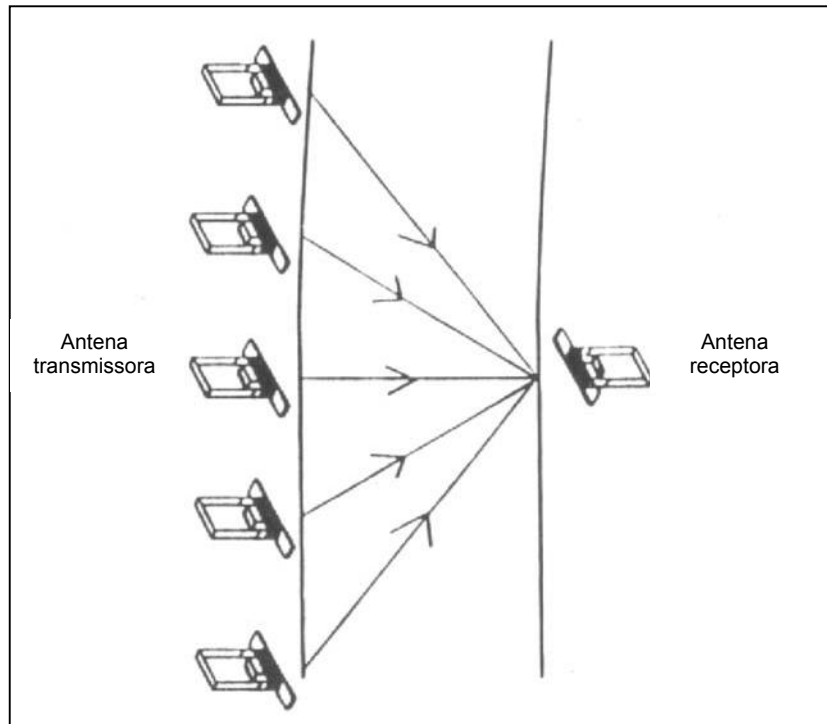


Figura 3: Arranjo transiluminação (Annan, 1992).

3.1 Vantagens e aplicações do GPR

Os avanços que a técnica de GPR sofreu nas últimas décadas possibilitaram obter resultados com grande resolução, proporcionando uma crescente aplicabilidade para diversos fins, sendo empregado, por exemplo, no estudo em detalhe da subsuperfície rasa e oferecendo uma possibilidade de mapeamento com alta resolução de estruturas e outras feições geológicas.

O GPR apresenta uma série de vantagens, das quais Mellett (1995) citou as mais importantes:

- a) escala de feições resolvidas pelo GPR varia desde poucos centímetros a dezenas de metros com a utilização de diferentes antenas;
- b) fornecimento de perfis contínuos de alta resolução;
- c) os levantamentos apresentam excelente repetibilidade, sendo possível uma avaliação da qualidade dos dados durante o processo de aquisição e o reposicionamento das antenas quando necessário;
- d) precisão na localização de feições ou objetos enterrados na subsuperfície;
- e) sendo possível o uso de antenas blindadas, o GPR possui vantagens em relação aos outros métodos, principalmente no ambiente urbano.

Portanto, o GPR vem sendo amplamente aplicado nas áreas de engenharia, meio ambiente e geologia, como mostram os exemplos a seguir:

- ❖ verificação das condições de leitos asfálticos e de estruturas de edificações;
- ❖ prospecção mineral e de água subterrânea;
- ❖ identificação de plumas de contaminação e cavidades no subsolo;

- ❖ localização de tubulações enterradas e auxílio na caracterização de sítios arqueológicos, a partir da identificação de construções e estruturas arqueológicas. Esta linha mostra grandes perspectivas para a indústria petrolífera, onde as condições gerais de obras enterradas como oleodutos, gasodutos e tanques podem vir a ser avaliados e monitorados através do GPR;
- ❖ definição da espessura de solo sobre embasamento rochoso;
- ❖ localização de estruturas geológicas.

Porém, em termos teóricos, dois aspectos principais podem ser fatores impeditivos para uma análise estrutural nos sedimentos quaternários em regiões tropicais: (1) o forte intemperismo torna os materiais litológicos ricos em minerais de argila, que por sua vez produzem uma forte atenuação no sinal de radar e; (2) o baixo contraste de impedância entre os sedimentos texturalmente similares, uma vez que é pequeno o deslocamento causado pelas falhas de pequena e média escala que predominam neste tipo de sedimento.

4 ÁREA DE ESTUDO

4.1 Localização

A Bacia de Resende está localizada no curso médio do rio Paraíba do Sul, ao extremo sul do Estado do Rio de Janeiro, englobando as cidades de Barra Mansa, Quatis, Porto Real, Resende e Itatiaia (Figura 4). A extremidade ocidental da bacia está situada próxima à sede industrial de Engenheiro Passos e a extremidade oriental está na cidade de Quatis, próximo à divisa com o município de Barra Mansa. Geograficamente, a área da Bacia de Resende, situa-se entre os paralelos 22°22' e 22°30' de latitude S, e 44°12' e 44°30' de longitude W.

O afloramento estudado situa-se ao lado da rádio Agulhas Negras, paralelamente a rodovia. A principal via de acesso à área de estudo é a rodovia Presidente Dutra (BR-116), que atravessa a maior parte da Bacia de Resende na direção E-W, entre Floriano e Engenheiro Passos.

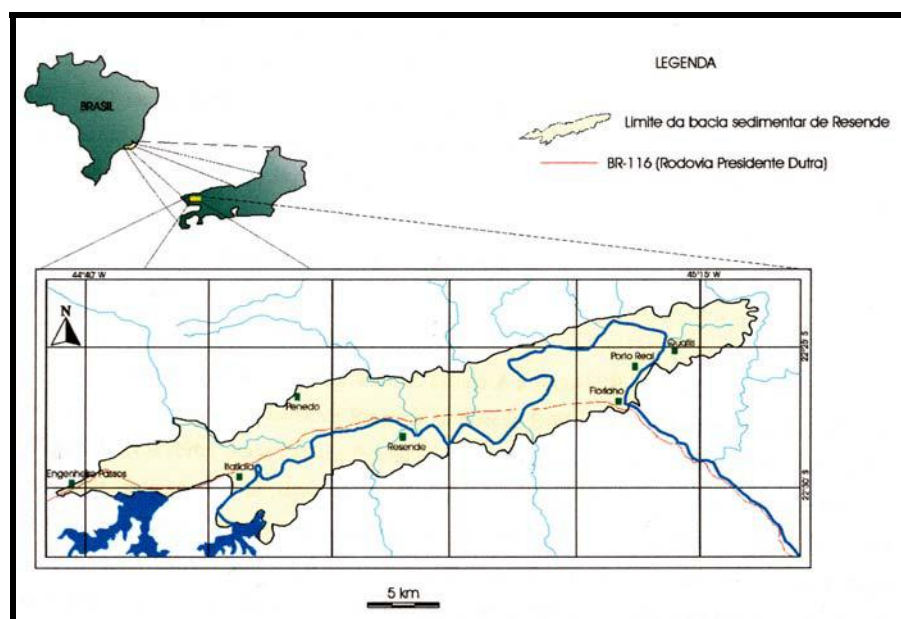


Figura 4: Mapa de localização da Bacia de Resende (modificado de Castro, 2000)

4.2 Aspectos Fisiográficos

4.2.1 *Clima e Vegetação*

De acordo com o Projeto RADAMBRASIL (Gatto *et al.*, 1983), o clima predominante na região é o clima tropical úmido a subúmido, cujas temperaturas estão dentro do intervalo de 20° a 25° C, e com índices pluviométricos anuais variando de 1.100 mm a 1.700 mm.

Em relação à vegetação, ela ultimamente já vem sendo bastante descaracterizada na região devido a ações antrópicas. A vegetação primitiva da região é dividida em dois tipos: floresta subcaducifolia tropical e campo. O primeiro tipo é encontrado nas escarpas da serra estendendo-se ao longo do vale do rio Paraíba do Sul. O segundo tipo ocorre na região serrana, em altitudes superiores a 1.900 m, sendo composta por uma cobertura herbácea intercalada por arbustos de pequeno porte.

4.2.2 Geomorfologia

A Bacia de Resende está inserida no médio vale do rio Paraíba do Sul, sendo limitada por escarpas de falha das serras do Mar e da Mantiqueira.

Segundo Ramos (2002), os diversos tipos e formas de relevo da região em estudo relacionam-se principalmente à sua evolução tectono-estrutural, às litologias, bem como aos fatores climáticos e paleoclimáticos.

A unidade geomorfológica Serra da Mantiqueira foi descrita por Silva *et al.* (1993) como um conjunto de degraus escarpados com altitudes entre 1.300 m e 2.600 m, com orientação geral NE - SW. Também é representada pelo Planalto da Bocaina, com altitudes variando entre 800 a 1.900 m e orientação predominante E - W.

Na região do médio vale do Paraíba do Sul, o relevo é caracterizado por colinas convexas. Albuquerque (2001) cita que a Bacia de Resende apresenta uma feição tabuliforme típica do Terciário.

4.2.3 Contexto geológico regional

A área estudada está compreendida entre o Maciço de Itatiaia (2.800 m) e a Serra da Mantiqueira (2.200 m), situados a N - NW, e a Serra da Bocaina (2.100 m), a S - SE. Está inserida no segmento central da Faixa Ribeira, caracterizado por rochas fortemente deformadas e metamorfozadas durante a orogênese Brasileira (Cordani *et al.*, 1973; Hasui *et al.* 1975). O Cinturão Ribeira foi afetado por eventos tectono-magmáticos relacionados à ruptura continental e abertura do Oceano Atlântico, denominada “Evento Sul-Atlântico”, durante o período Cretáceo. No início do Terciário, formaram-se depressões continentais ao longo dos alinhamentos tectônicos do Cinturão Ribeira, onde se encaixaram as depressões das bacias de Resende, Taubaté, São Paulo (Melo *et al.*, 1985).

A Bacia de Resende pertence ao “Sistema de Riftes da Serra do Mar” (Almeida, 1976), juntamente com outras bacias tafrogênicas de idade terciária, incluindo as bacias de São Paulo, Taubaté e Volta Redonda, além de outras menores, como Itaboraí e Bonfim. O referido sistema é uma depressão tectônica alongada paralelamente à linha de costa atual, E - NE, situada entre as cidades de Curitiba e Rio de Janeiro, com eixo longitudinal medindo 50 Km e largura 5 a 6 Km (Figura 5).

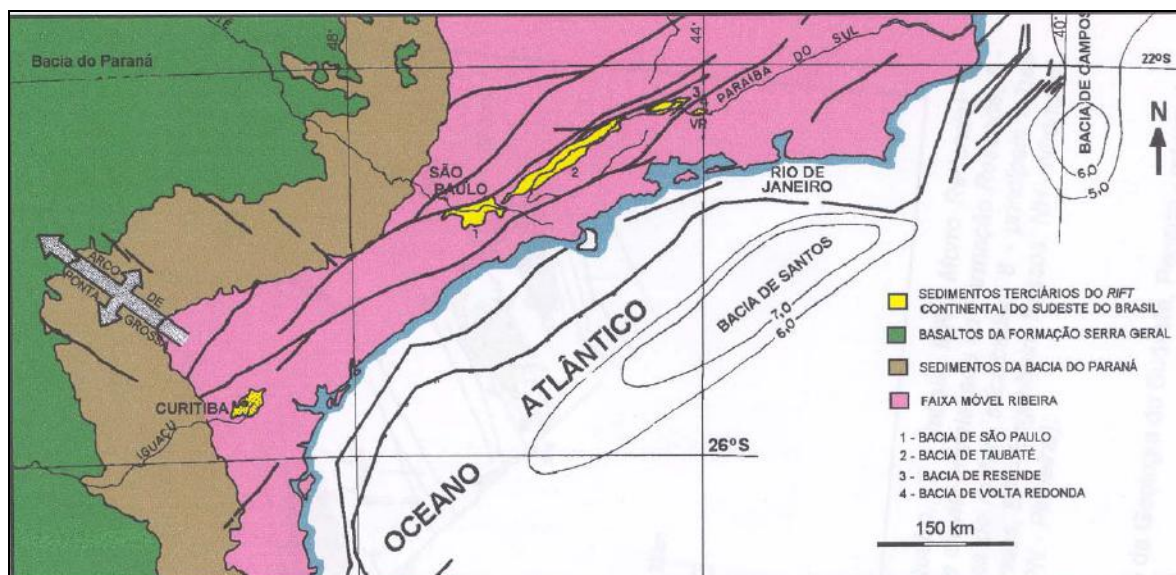


Figura 5: Estruturação regional do Rifte Continental do Sudeste do Brasil (modificado de Melo et al., 1985b, cedido por Albuquerque, 2001)

Segundo Riccomini (1989), o substrato da Bacia de Resende, formado por embasamento cristalino pré-cambriano, é constituído por rochas metamórficas (milonito-gnaisses, milonitos, gnaisses bandados, gnaisses graníticos, xistos, quartzitos e anfibolitos bandados), ígneas (granitos, pegmatitos e aplitos) e migmatitos com estruturas variadas. Também possui intrusões de diabásio sob a forma de diques e *sills*, que marcam a primeira fase de magmatismo do Evento Sul-Atlântico. Nos arredores da Bacia de Resende ocorrem grandes maciços alcalinos cretácicos e terciários (Melo et al., 1985), denominados Morro Redondo, Itatiaia e Passa Quatro, com rochas nefelina-sienitos, quartzo sienitos e também diques de *sills* de traquito e fonolito, de idade entre o final do Cretáceo e o início do Terciário. Na borda norte da Bacia de Resende são encontradas faixas de rochas silicificadas que acompanham falhamentos normais.

Segundo Melo (1985), o preenchimento sedimentar é estritamente continental, constituído por terrígenos depositados em ambientes lacustres e fluviais. Estes sedimentos foram datados bioestratigraficamente, indicando idades que variam entre o Eoceno Superior e o Oligoceno.

4.4 Estratigrafia

O estudo estratigráfico da Bacia de Resende teve seu início em meados da década de 1970 por Amador e sucessivamente por Melo (1985), Riccomini (1989), Lima & Melo (1994 *apud* Ramos 1997) e Ramos (1997) que reformularam e complementaram a pesquisa.

Amador (1975) e Amador *et al.* (1978) fizeram estudos detalhados nos sedimentos da Bacia de Resende através de relações estratigráficas de campo e análises mineralógicas e texturais. Esses autores definiram duas unidades estratigráficas terciárias principais baseadas em critérios sedimentológicos e geomorfológicos. São elas: Formação Resende (Mioceno-Plioceno) e Formação Floriano (Pleistoceno). Além dessas formações terciárias, foram descritos os depósitos holocênicos.

Para os depósitos cenozóicos da Bacia de Resende, Melo *et al.* (1985) indicam somente a existência da Formação Resende. Os depósitos da Formação Floriano atribuem-se como correspondentes ao produto de alteração intempérica dos depósitos da Formação Resende, apresentando diferenciações de coloração, tipos de minerais de argila, presença de feldspatos e de minerais pesados instáveis. Ele subdividiu a Formação Resende em dois tipos principais: fácies rudácea e fácies fluvial.

Ramos (1997) propôs uma revisão estratigráfica para o preenchimento sedimentar da bacia. Os depósitos terciários compreendem, nesta ordem estratigráfica, a Formação Quatis, Formação Resende composta pelos membros Itatiaia e Acácias e Formação Floriano, além dos depósitos quaternários.

A Formação Quatis, de idade paleocênica ou neo-cretácea, constitui a base dos depósitos terciários. Representa um sistema fluvial entrelaçado, sendo constituída por depósitos conglomeráticos diminuindo a granulometria para depósitos arenosos em direção ao topo. Este fato é interpretado por Ramos (1997) como um contínuo aumento de subsidência numa bacia rasa ainda no início de formação.

A Formação Resende é predominante na bacia, possuindo vários e esparsos depósitos paleogênicos na região. É constituída por fácies de leques aluviais proximais e médios e sistema fluvial entrelaçado com fluxos gravitacionais. Sendo Rodrigues, L. H. O. 2004. Levantamento Geofísico com Radar de Penetração no Solo (GPR) Visando Caracterização Estrutural em um Afloramento na Bacia de Resende – RJ. UFRJ.

assim, Ramos (1997) formalizou dois membros de acordo com a distinção entre as características litológicas, composicionais e faciológicas.

O Membro Itatiaia também é constituído por depósitos de leque aluvial com fácies muito parecida com a descrita na Formação Resende típica. Além disso, são sincrônicas e interdigitadas. Portanto, esse membro foi individualizado para designar a variação composicional dos detritos que compõem o leque aluvial. Esse tipo de depósito é rico em detritos alcalinos localizados aos redores dos maciços alcalinos de Itatiaia e Morro Redondo, constituindo-se por litologias com cores mais claras, cinzentas ou esbranquiçadas. Sendo assim, a distinção é basicamente petrográfica.

O membro mais ao topo da Formação Resende é denominado Membro Acácias. Constitui os depósitos da associação de fácies de um sistema fluvial entrelaçado com afogamentos episódicos. Este membro possui sucessões eminentemente fluviais, descritos por Ramos (1997) como arenitos arcoseanos e ruditos finos com pouca matriz caulínica, de tons esbranquiçados a avermelhados, e camadas pelíticas sedimentadas através de decantação.

Ao topo dos depósitos terciários ocorrem os depósitos da Formação Floriano, característicos de um sistema fluvial meandrante. Trata-se de uma sucessão de arenitos e espessos pacotes de lama com colorações diferentes das camadas pelíticas do membro anterior. Encontram-se alguns depósitos desta formação sobre a soleira de Resende, que se constitui em um alto topográfico durante o preenchimento da bacia, evidenciando que este sistema fluvial constitui o último preenchimento sedimentar terciário.

4.5 Arcabouço Estrutural

Melo (1985) apresentou as estruturas do embasamento principalmente pelas foliações metamórficas com direção E - NE e secundariamente por quatro famílias de juntas subverticais referentes ao ciclo brasileiro num estágio tarditectônico. Esse embasamento foi extremamente afetado pela reativação meso-cenozóica, cujos esforços foram estudados por Melo *et al.* (1983). Definiram uma direção média NNW - SSE de esforço trativo na região da Bacia de Resende e vizinhanças.

Através de estudos a partir de trabalhos de campo feitos por Melo (1985), foram definidas na Bacia de Resende duas direções de falhas normais (E - NE e N - NE). A primeira é longitudinal ao eixo da bacia e paralela às estruturas do embasamento e a segunda é oblíqua ao eixo. Também foram observadas falhas entre as estruturas reativadas no Mesozóico-Cenozóico, com direções N - NW e W - NW. Foram analisados lineamentos fotogeológicos demonstrando compatíveis as direções regionais com as direções nos sedimentos de Resende. Assim como foram compatíveis também esses dados com a direção da foliação metamórfica do embasamento e as quatro famílias de juntas subverticais estudadas regionalmente.

Asmus & Ferrari (1978) e Hasui & Ponçano (1978) definiram um padrão estrutural para a Bacia de Taubaté que é idêntico para a Bacia de Resende: como uma “*depressão tectônica assimétrica em forma de semi-gráben, desenvolvida no limite de blocos falhados e basculados para noroeste*”. Esse padrão foi definido aliado a fatos descritos por Melo (1985), como a disposição dos depósitos da fácies rudácea e das principais falhas normais da área, ao basculamento dos sedimentos em direção a noroeste e à morfologia da área.

Segundo Riccomini (1985), a atividade tectônica na região foi muito intensa durante o Terciário e atenuou-se com o tempo, sendo que ainda hoje, no Quaternário, são observados os seus reflexos.

5 METODOLOGIA

5.1 Aquisição

O levantamento geofísico de campo realizado neste trabalho foi feito num afloramento próximo à rádio Agulhas Negras (Figura 6), num corte de estrada localizado paralelamente à Rodovia Presidente Dutra, no município de Resende (Rio de Janeiro). É uma região cujo domínio geomorfológico é caracterizado por colinas sedimentares suaves.

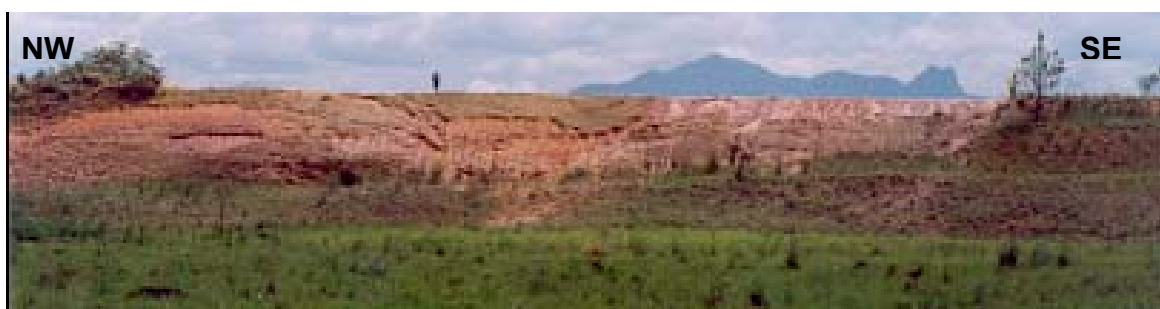


Figura 6: Afloramento estudado, localizado próximo à rádio Agulhas Negras.

Segundo Ramos (2002), este afloramento é formado por uma sucessão de camadas argilo-sílticas e camadas arenosas, cuja areia é composta por granulometria variada, cores avermelhadas e amareladas e, ainda em algumas áreas, possui grânulos e seixos na matriz (Figura 7). Corresponde, portanto, ao sistema fluvial meandrante da Formação Floriano recoberto por sedimentos quaternários.

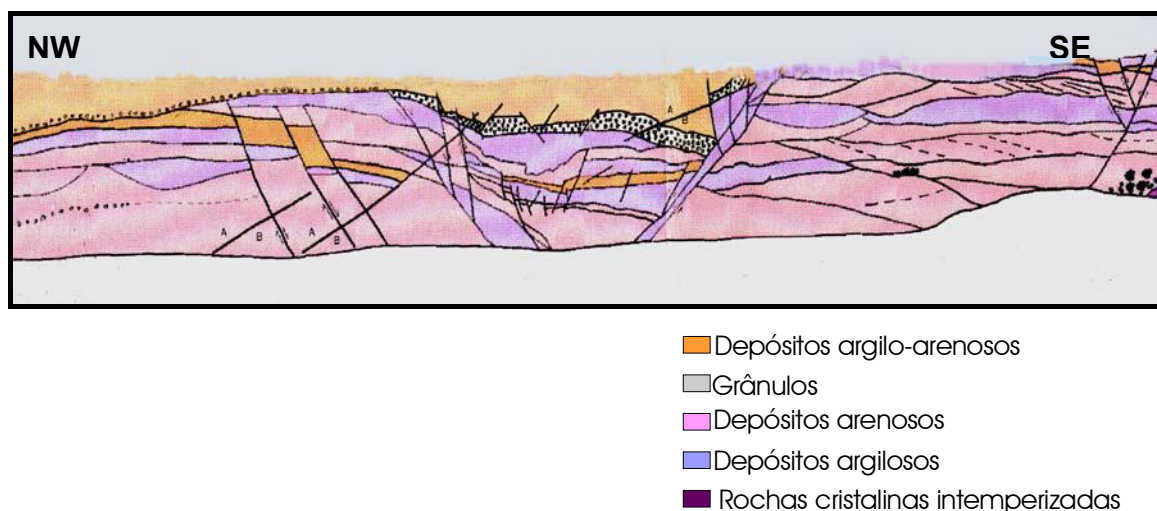


Figura 7: *Modelo estrutural de afloramento na Bacia de Resende. (Ramos, 2002).*

Foi escolhido este afloramento devido às seguintes vantagens apresentadas:

- 1) conhecimento prévio acerca dos aspectos geológicos do afloramento;
- 2) os aspectos estruturais do afloramento são muito notáveis, apresentando num mesmo corpo três fases tectônicas das bacias do Rifte Continental do Sudeste, descritas por Riccomini (1989):
 - Evento 1 - (E1) extensão NNW-SSE,
 - Evento 2 - (TS) transcorrência sinistral,
 - Evento 3 - (TD) transcorrência dextral.
- 3) a facilidade de acesso ao afloramento e a proximidade da região;
- 4) o afloramento está localizado numa área com pouca condutividade elétrica;
- 5) o afloramento possui uma área extensa e aplainada, o que favorece o manuseio do equipamento.

O levantamento foi realizado com o sistema PulseEKKoIV, pertencente ao Departamento de Geologia da UFRJ, adquirido através do projeto FUJB n° 8084-5. Este sistema, assim como outros sistemas típicos de GPR, possui uma unidade de controle, que gerencia a aquisição dos dados com capacidade de armazená-los, unidades de geração e captação do pulso eletromagnético, dois pares de antenas transmissoras e receptoras, uma com frequência de 50 MHz e outra com 100 MHz, e um aplicativo para visualização instalado num *laptop*. As antenas são ligadas à unidade de controle por cabos de fibra óptica, os quais reduzem ruídos provenientes do equipamento.

Este sistema é classificado como biestático, pois utiliza um par de antenas, diferente do monoestático, que apresenta uma única antena para transmissão e recepção do pulso. É mais vantajoso trabalhar com sistema biestático, pois, segundo Parasnis (1997), a razão sinal/ruído melhora significativamente.

Para esta aquisição foi utilizada a antena de 50 MHz, com uma profundidade de penetração de aproximadamente 12,5 m.

O posicionamento em campo dos perfis foi demarcado com uma corda e estacas, efetuando linhas paralelas com direção NW - SE e sentidos alternados, as linhas pares com sentido SE e linhas ímpares com sentido NW.

Foram realizados 20 perfis de forma a cobrir parcialmente a área. O levantamento foi feito a partir do método *common offset*, isto é, com afastamento constante, com o *offset* inicial de 2 m entre as antenas transmissoras e receptoras e com deslocamento contínuo de 0,5 m. O espaçamento utilizado foi de 1 m para cada linha. A Figura 8 mostra um desenho esquemático deste levantamento.

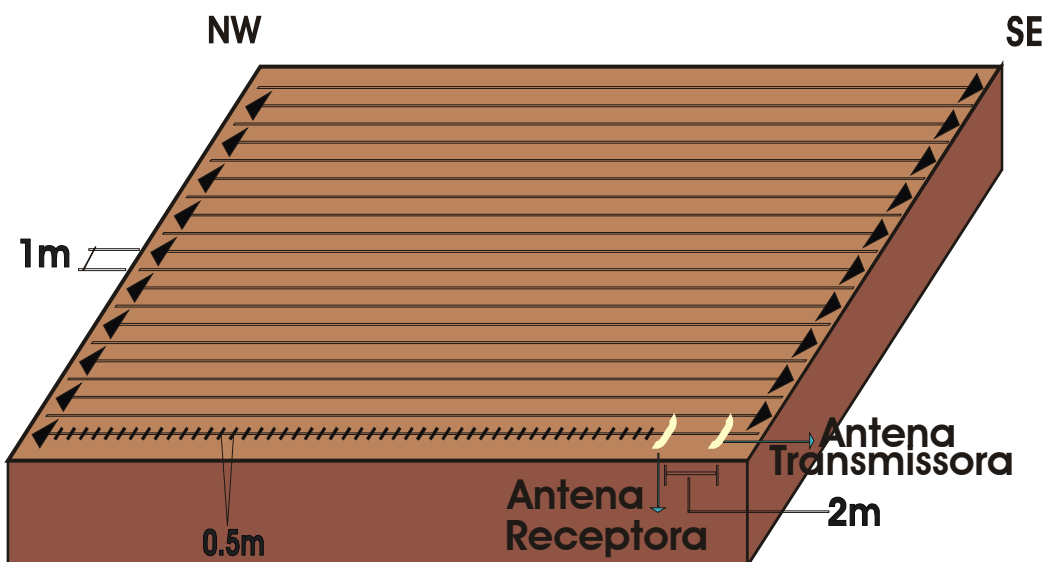


Figura 8: Desenho esquemático do levantamento com GPR realizado no Afloramento da Rádio Agulhas Negras, Bacia de Resende.

Para análise de velocidade foi realizado um levantamento de arranjo *WARR* no posicionamento referente à linha 11. Foram efetuados 14 pontos para este levantamento, o que correspondente à metade do número de pontos feitos para o levantamento de cada linha.

5.2 Processamento

O processamento foi realizado em dois momentos, o primeiro deles foi efetuado no Laboratório de Geofísica do Departamento de Geologia da UFRJ e o segundo no Laboratório do Centro de Pesquisas em Geologia e Geofísica da UFBA (CPGG/UFBA), com a supervisão do Professor Marco Antônio Botelho. Esta interação entre universidades foi realizada através de um intercâmbio entre o prh-anp/mct nº 18, Programa de Recursos Humanos/ANP, da UFRJ, coordenado pelo professor Leonardo Borghi e o prh-anp/mct nº 8, Programa de Pós-Graduação e Graduação em Geofísica e Geologia para o Setor Petróleo e Gás, da UFBA, coordenado pelo professor Hédison Kiuity Sato.

Na UFRJ teve-se o primeiro treinamento com o “pacote” geofísico utilizado neste trabalho, ou seja, o *software* GRADIX® v1 da INTERPEX (EUA), baseado em DOS. Neste contato inicial com o algoritmo o objetivo principal foi conhecer e testar as ferramentas que seriam utilizadas para o processamento dos dados.

Na UFBA testou-se as várias opções de fluxogramas visando melhorar a qualidade dos dados para uma melhor visualização das estruturas geológicas procurando ajustar, da melhor maneira, a análise espectral de cada perfil.

A seguir serão descritas, respectivamente nos tópicos 5.2.1 e 5.2.2, o treinamento realizado no Laboratório de Geofísica do Departamento de Geologia da UFRJ e o processamento realizado no Laboratório do Centro de Pesquisas em Geologia e Geofísica da UFBA (CPGG/UFBA).

5.2.1 *Treinamento realizado na UFRJ*

Nesta etapa do trabalho foram estudadas e testadas as ferramentas do GRADIX® v1 que seriam provavelmente utilizadas no fluxograma do processamento.

A seguir será mostrada uma revisão bibliográfica com a discussão dos conceitos teóricos das ferramentas que efetivamente foram utilizadas para a confecção do fluxo de processamento. Nesta revisão foi utilizado basicamente o manual do GRADIX® v1. As demais ferramentas testadas no treinamento realizado na UFRJ, não estão descritas neste relatório, mas podem ser vistas em detalhe no manual acima citado. Apresenta-se ainda como ilustração os respectivos efeitos que aparecem nas seções após a utilização de cada uma delas.

As ferramentas que foram utilizadas no processamento estão listadas a seguir:

Import

Set Time Zero

Windows Traces

Filtro Passa – Banda

Filtro Gaussiano

Trace Mix

Import

A ferramenta *import* é a primeira etapa realizada no GRADIX® v1 para qualquer processamento. Ela consiste na importação dos dados (adquiridos em campo) diretamente para o *software* a fim de que, o dado possa ser visualizado.

É visualizado o dado da forma em que foi adquirido em campo, como mostra a Figura 9.

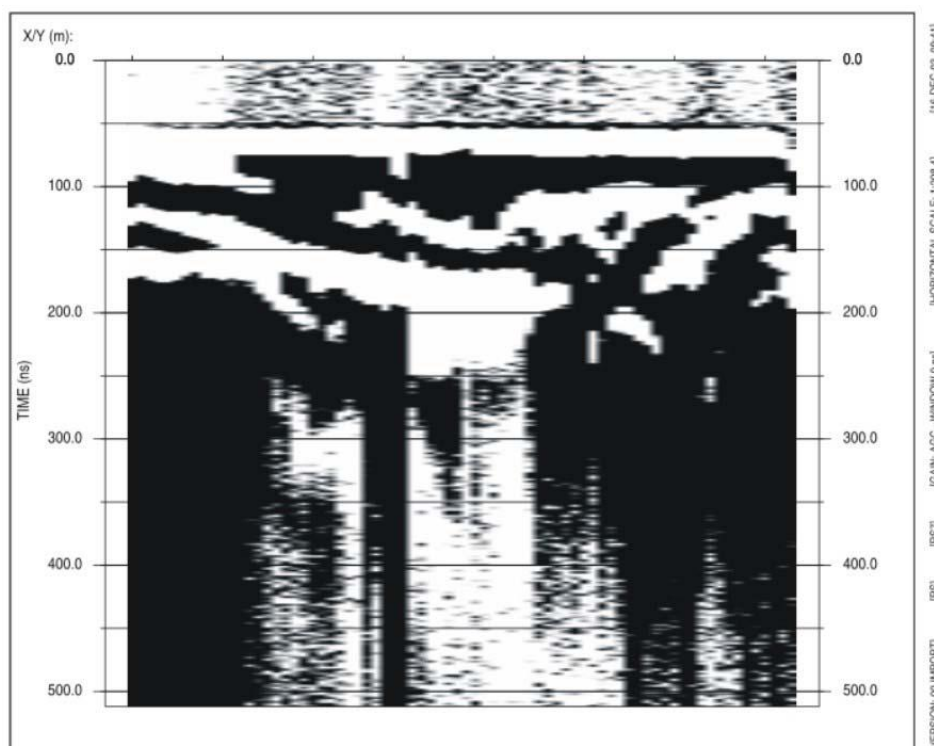


Figura 9: **Import** – A Figura mostra a visualização dos dados como foram adquiridos em campo.

Windows Traces

Cada medida adquirida na superfície, corresponde a um traço no perfil. Quando o levantamento não é realizado na mesma direção pode ser necessário inverter os dados para que todos fiquem na mesma direção. Ou seja, o traço 1 torna-se o traço n e vice-versa (para n, o último traço).

Geralmente este procedimento é necessário quando se pretende imagear uma área em 3D.

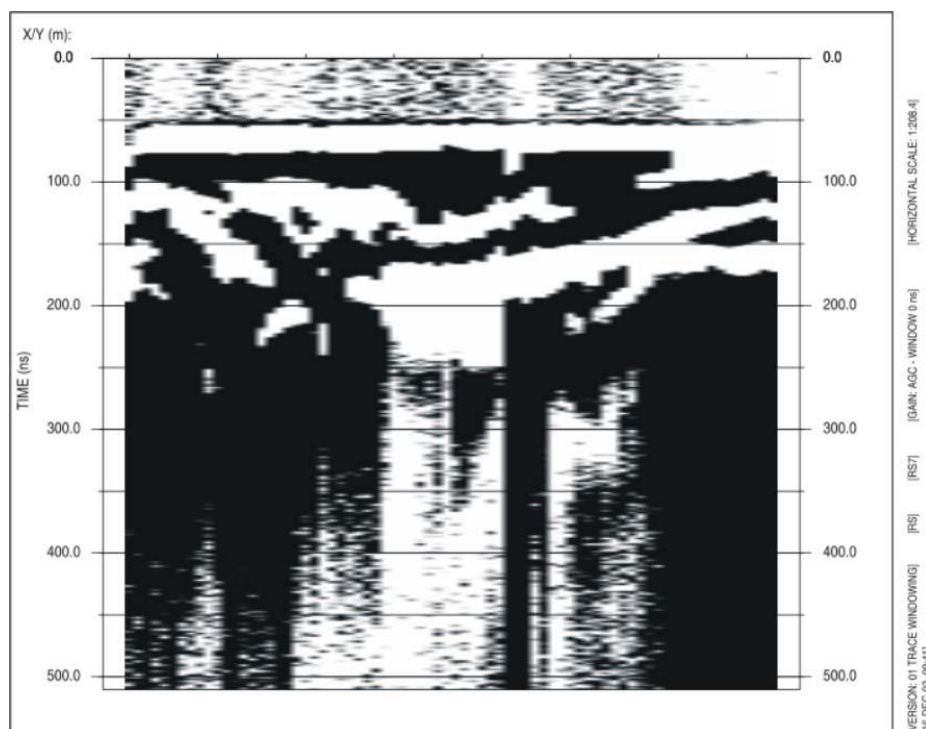


Figura 10: Mostra a aplicação da ferramenta *Trace Windowing* no perfil apresentado na Figura 9.

Observa-se que esta seção está invertida com relação ao eixo X.

Set time zero

A ferramenta *Set Time Zero* estabelece o verdadeiro tempo zero. Como pode ser visualizado na Figura 9 o valor zero na coordenada tempo (Y) não está exatamente correspondendo ao início do primeiro refletor. Através desta ferramenta pode-se determinar mais precisamente a superfície em que foi adquirido o dado sendo possível alinhar o tempo zero para todas as seções. Este ferramenta deve ser utilizada antes de qualquer análise de velocidade quando se tem a intenção de converter os dados de tempo para profundidade.

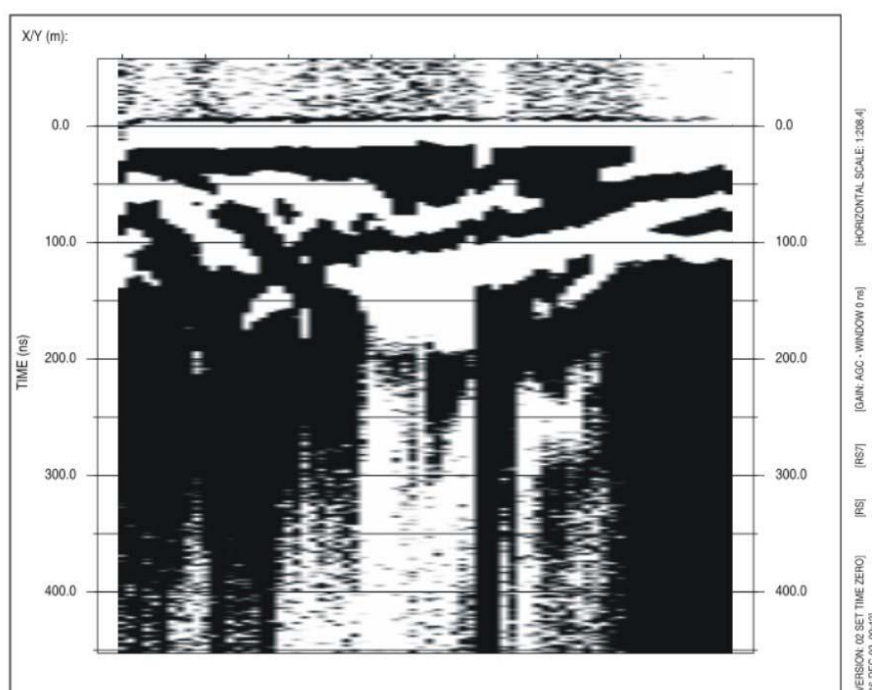


Figura 11: *Mostra a utilização da ferramenta Set time zero no perfil apresentado na Figura 10. Pode-se observar na seção que o tempo zero foi ajustado para o início do primeiro refletor.*

Filtro Passa-banda do tipo Butterworth

O objetivo dos filtros num processamento é a retirada dos ruídos, isto é, componentes de freqüência indesejados, o que traz uma melhora significativa na relação sinal/ruído. Eles são funções que definem a forma como o espectro de amplitude de um sinal vai ser cortado. O filtro passa-banda, portanto, mantém as freqüências intermediárias, realçando as feições horizontais contínuas. Ele mantém apenas os componentes de freqüência pertencentes ao intervalo estabelecido, isto é, ao intervalo supostamente com menos ruídos. Geralmente se representa um filtro passa-banda como se ele fosse uma caixa quadrada, mas na prática ele precisa ter uma transição suave entre o intervalo de freqüência a ser preservado e aquele que vai ser cortado.

O filtro passa-banda do tipo *Butterworth* é caracterizado por um passa-banda planar. Ele é freqüentemente usado como um filtro anti-alias (manual do GRADIX® v1).

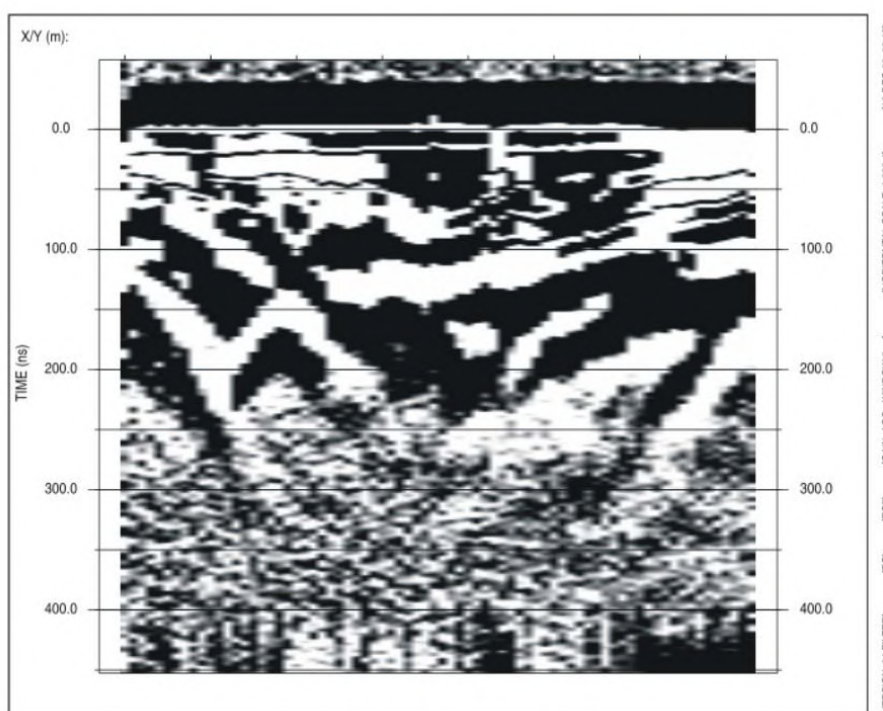


Figura 12: Mostra a aplicação do Filtro Passabanda do tipo Butterworth no perfil apresentado na Figura 11 .O ressalte dos refletores é decorrente da retirada das freqüências indesejadas.

Filtro Gaussiano

O filtro gaussiano possui as mesmas características e utilidades do filtro passa-banda citadas anteriormente, no entanto, a mudança está na forma do filtro, que em vez de uma caixa quadrada, é uma função gaussiana em forma de um sino.

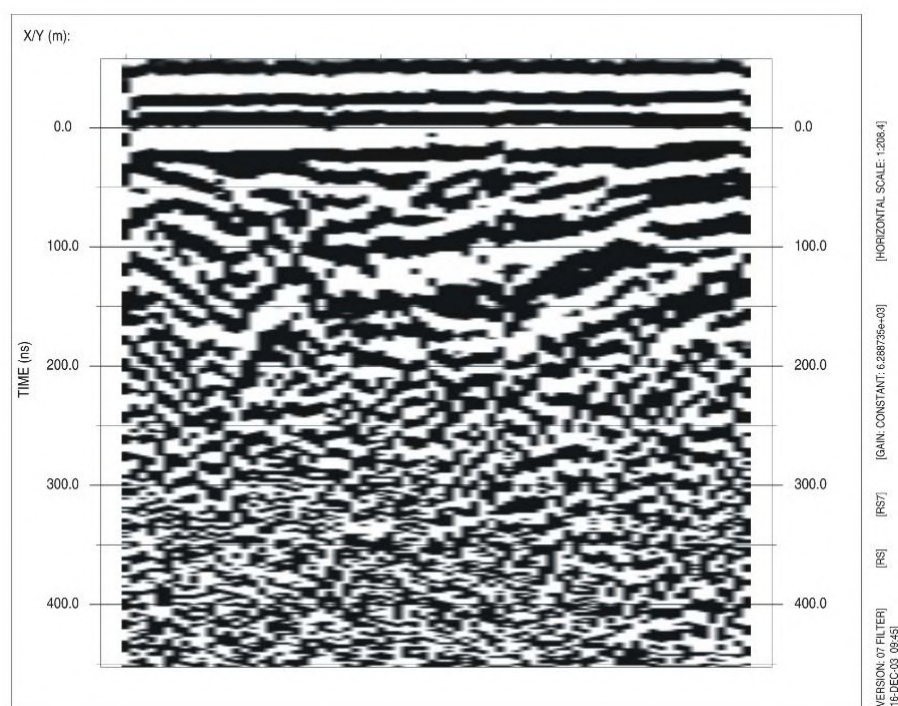


Figura 13: Mostra a aplicação do filtro gaussiano na seção apresentada na Figura 12. Observa-se que a retirada das baixas frequências melhorou a visualização dos refletores presentes no perfil.

Trace Mixing

Trace mixing é uma técnica de suavização de dados. O algoritmo faz a média entre os traços adjacentes a um determinado traço central. Segundo o manual pode-se escolher o número de traços que será utilizado no procedimento. Esta função ocasiona uma relativa suavização na horizontal.

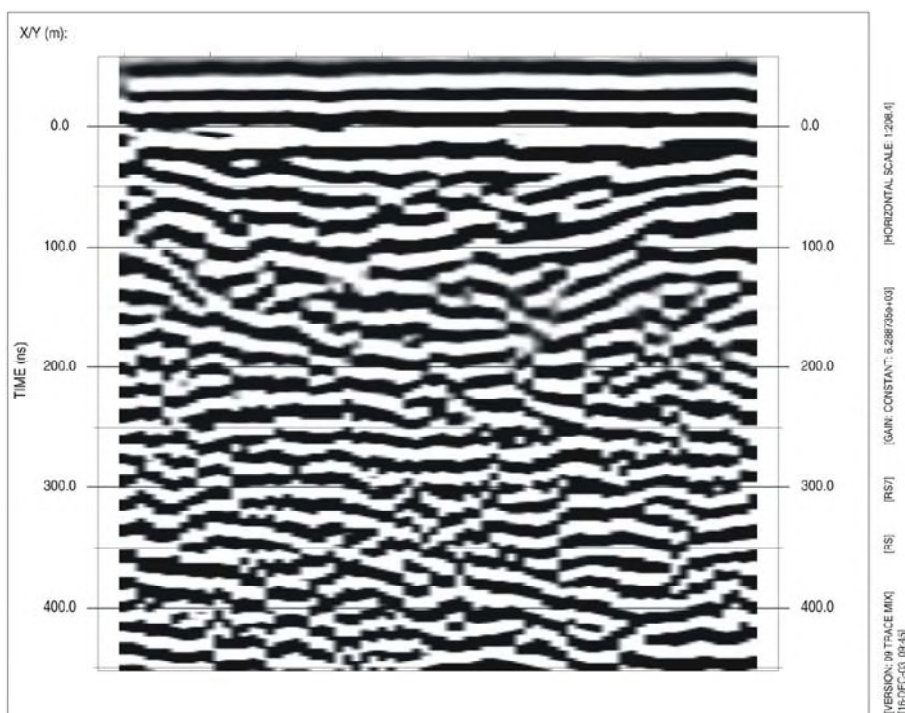


Figura 14: Mostra a aplicação da ferramenta trace mix no perfil apresentado na Figura 13. Nesta Figura pode-se observar a suavização dos refletores no perfil.

5.2.1 *Processamento realizado na UFBA*

Como citado anteriormente no tópico 5.2, realizamos no CPGG/UFBA, através de um intercâmbio com o prh-anp/mct nº 8, o trabalho de processamento dos dados. Foi construído um fluxo de processamento com o *software* GRADIX® v1 visando ressaltar a visualização das estruturas. Procurou-se ajustar a análise espectral de cada seção.

Depois de várias tentativas conseguiu-se montar um fluxo com sete etapas, que serão descritas abaixo, tomando-se a seção 3 apresentada no anexo 1. As etapas são descritas nas Figuras 15 a 21 com suas respectivas legendas.

ETAPA 1 – Import

Nesta etapa importou-se os dados para o GRADIX® v1. A seção ainda não está processada, é visualizada como foi adquirida em campo.

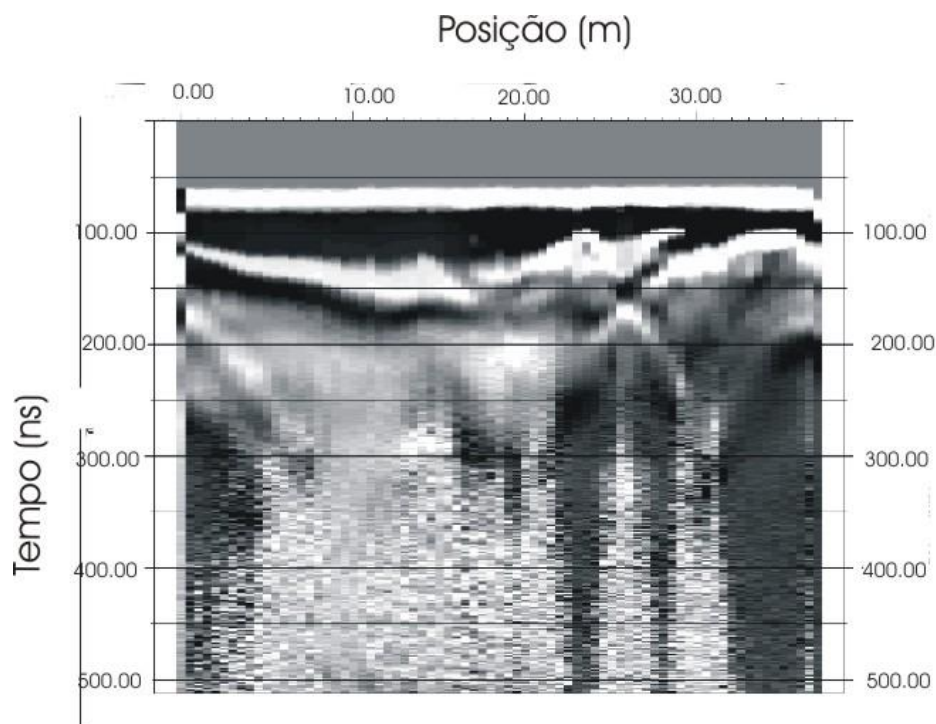


Figura 15: *Etapa 1(Import)* – Mostra os dados como foram adquiridos no campo - seção sem processamento.

ETAPA 2 – Set Time Zero

Nesta etapa ajustou-se o tempo zero alinhando todas as seções como já foi explicado anteriormente.

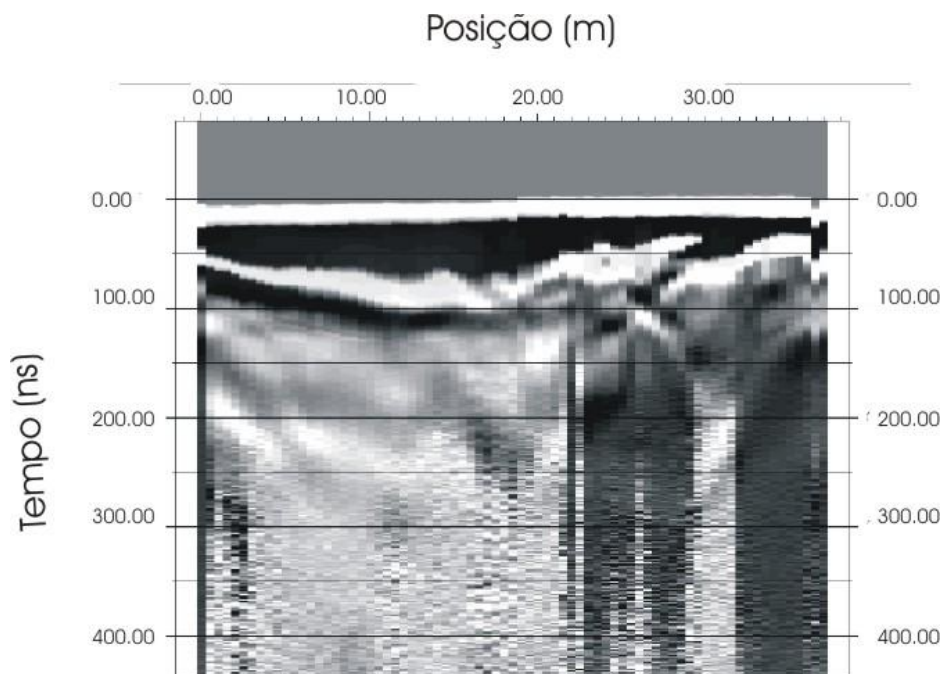


Figura 16: *Etapa 2 (Set time zero). É mostrado o efeito sobre a seção da Figura 15. Pode-se observar que os refletores começam no tempo zero.*

ETAPA 3 – *Windows Traces*

Nesta etapa o perfil foi invertido através do parâmetro *reverse order* e também se utilizou o parâmetro *start time*, com valor de 0ns (zero nanosegundos), para retirada da faixa cinza acima do tempo zero.

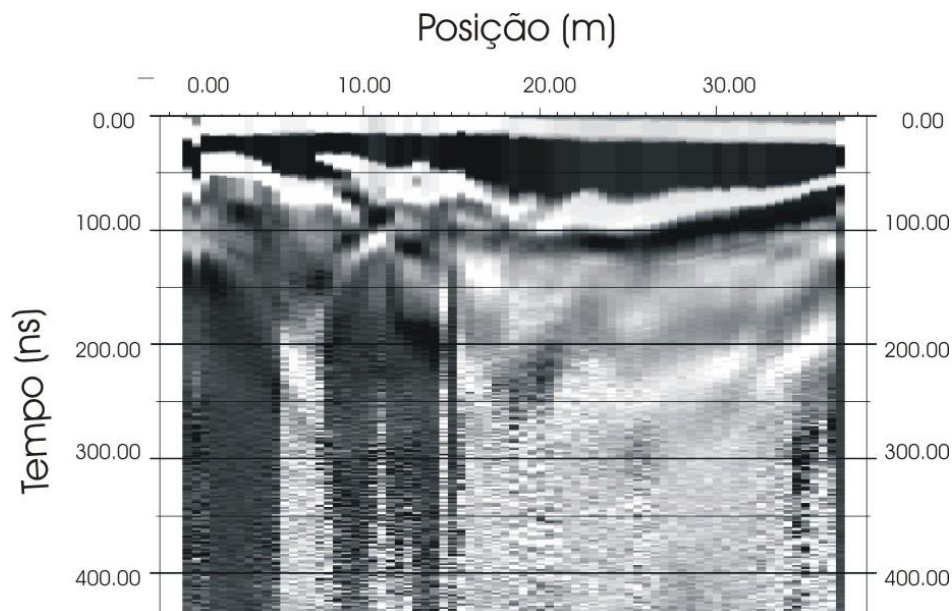


Figura 17: *Etapa 3 (Trace Windowing)* – Mostra a seção invertida em relação a seção da Figura 16 e o efeito da aplicação do *start time* que retirou a faixa em cinza da seção anterior.

ETAPA 4 – Filtro Passa-banda do tipo *Butterworth*

Nesta etapa foi preservado o intervalo de frequência 3 MHz a 60 MHz visando à preservação das frequências mais baixas. Pode-se observar a melhora na visualização da seção.

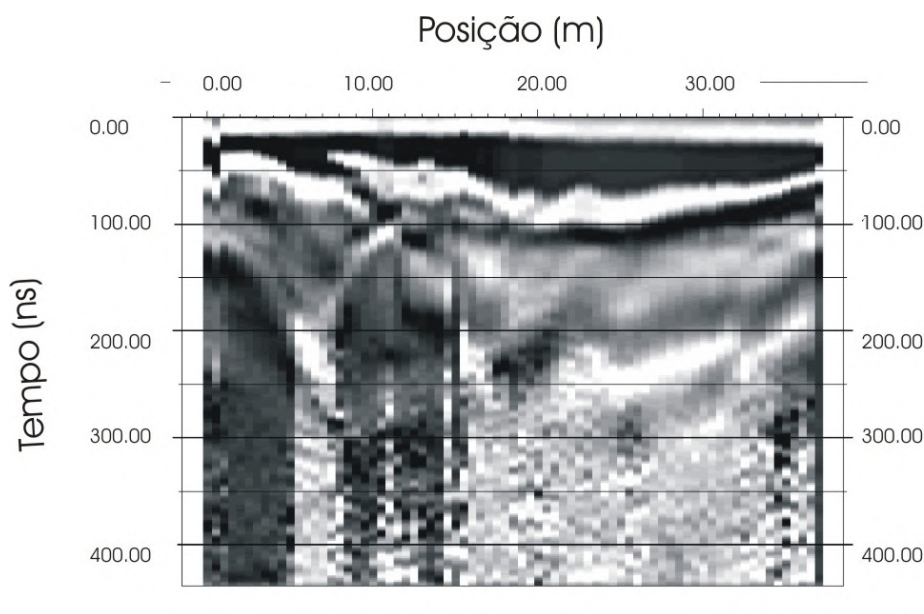


Figura 18: *Etapa 4 (Filtro Passabanda Butterworth) – após a aplicação deste filtro pode-se observar melhor definição dos refletores.*

ETAPA 5 – Filtro Gaussiano

Foi utilizado este filtro com frequência central de 50 MHz para retirada das frequências muito baixas que apareciam na seção em forma de manchas.

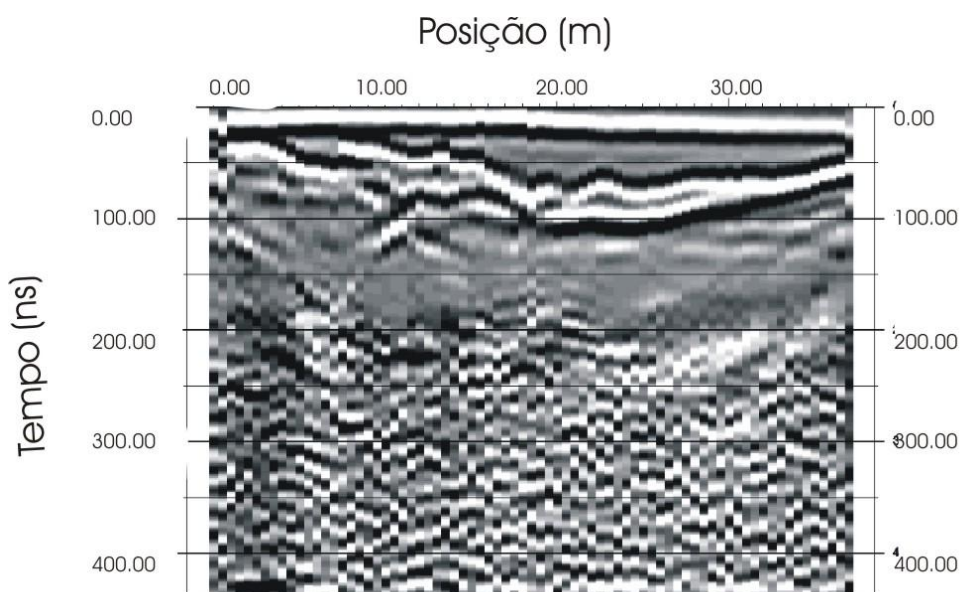


Figura 19: *Etapa 5 (Filtro Gaussiano) – Pode-se observar que com a aplicação deste filtro foram retiradas manchas possivelmente causadas pelas frequências mais baixas do dado.*

ETAPA 6 – Filtro Gaussiano

Foi reutilizada esta função para a retirada das frequências baixas que ainda estavam presentes no dado, fato verificado através das manchas que permaneceram na seção mostrada na Figura 19. Nesta etapa foi utilizado o filtro gaussiano com um frequência central de 50MHz.

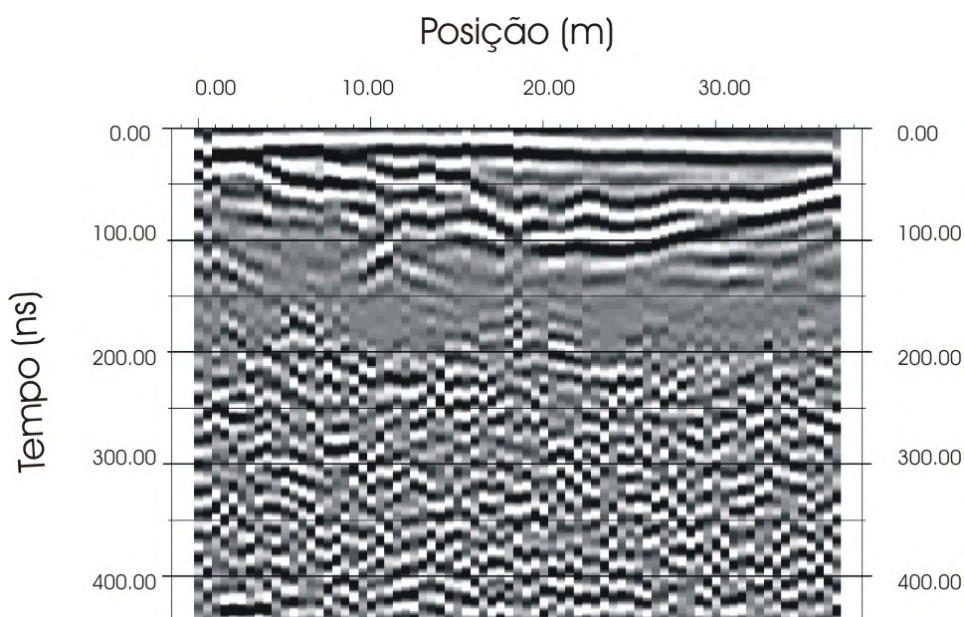


Figura 20: Etapa 6 (Filtro Gaussiano)- Pode-se observar a melhora na visualização desta seção em relação à seção anterior (Figura 19) com a retirada de manchas provenientes de baixas frequências.

ETAPA 7 – Trace Mixing

Foi utilizado o *Trace Mix* com 7 traços para dar uma suavização no dado processado. Este procedimento foi exemplificado para 5 traços mas, nos testes verificou-se que o número ideal, no nosso caso, seria de 7 traços.

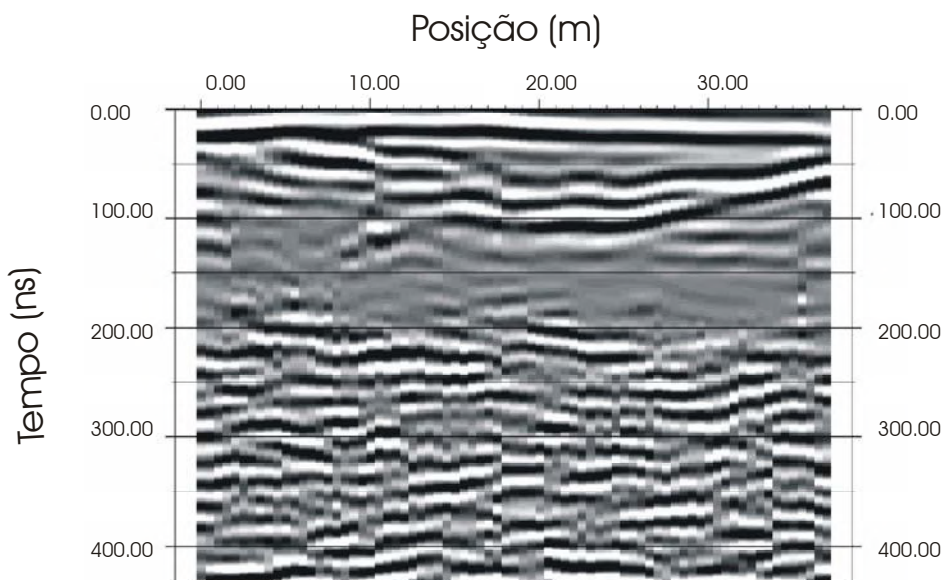


Figura 21: Etapa 7 (*Trace Mix*) - Pode-se observar a suavização do dado processado em relação à seção da Figura 20. A aplicação desta ferramenta forneceu uma maior continuidade dos refletores.

6 RESULTADOS

As vinte seções processadas na UFBA estão apresentadas no Anexo I em gráficos de distância X tempo. Para cada seção processada é apresentado também o dado original. A partir da análise de velocidade pode-se converter os dados obtidos em tempo para profundidade e os resultados são mostrados a seguir.

Para a interpretação dos dados foram escolhidas cinco seções (1, 5,10,15 e 18) visando cobrir parcialmente a área estudada. No tópico a seguir (tópico 6.1) é descrita a maneira como foi realizada a conversão dos dados para profundidade e, no tópico 6.2 serão mostradas as seções interpretadas.

6.1 Análise de Velocidade

Foi realizada a análise de velocidade a partir de dados coletados em campo. Como citado no tópico 5.1 (Aquisição), fez-se um levantamento utilizando-se o arranjo WARR e tomando-se como base a linha 11, com *offset* inicial de 2 metros entre as antenas transmissora e receptora. Foram efetuados 14 pontos consecutivos.

Para a análise de velocidade foi utilizada a análise hiperbólica realizada com o GRADIX® v1. A seguir serão mostrados os resultados.

Análise Hiperbólica:

Esta análise foi feita diretamente no perfil. Na abscissa encontra-se a posição (x) e na ordenada o tempo (t). Constrói-se um gráfico (X^2 x t^2) e, a partir dele, adquirem-se os parâmetros da seguinte fórmula:

$$t_f^2 = t_0^2 + \frac{(x)^2}{(v)^2}$$

onde, **t** = tempo, **x** = posição e **v** = velocidade.

Neste método foram encontrados os seguintes valores de velocidade e tempo:

$$(v=70,62 \text{ m}/\mu\text{s e } t=120,46 \text{ ns}).$$

De acordo com o valor de velocidade encontrado ($v=70,62 \text{ m}/\mu\text{s}$) foi feita a conversão de tempo para profundidade obtendo-se o máximo em torno de 15,0 m. A Figura 22 mostra a seção 5 já convertida em profundidade.

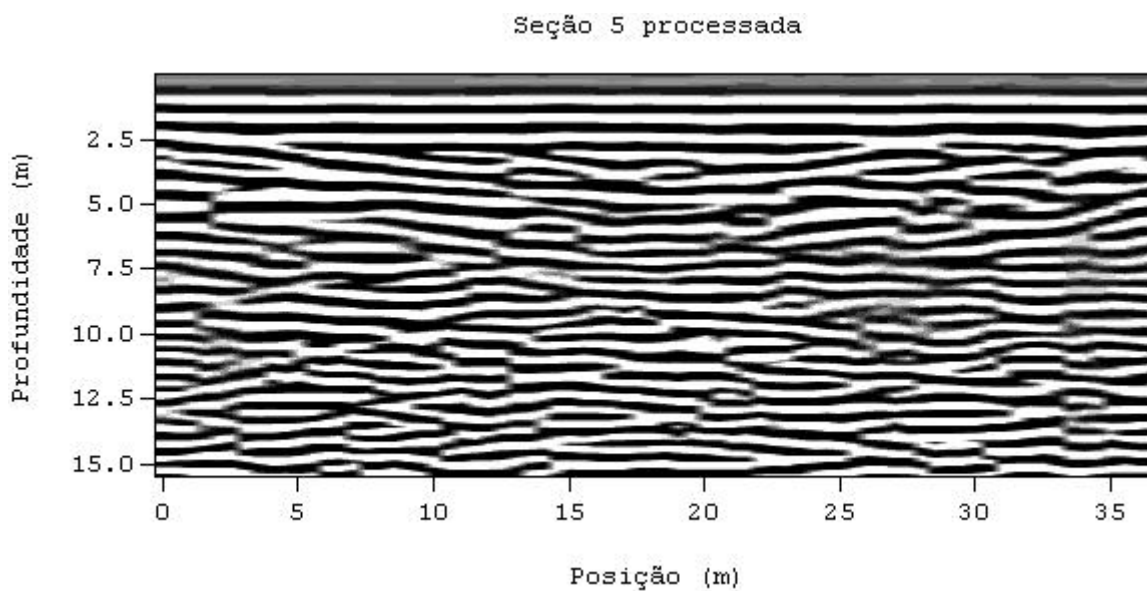


Figura 22: Mostra a Seção 5 convertida de tempo para profundidade.

6.2 Interpretação

Para a interpretação dos dados foram escolhidas cinco seções (1, 5, 15, 10 e 18) com o objetivo de cobrir a área de estudo. Para esta etapa foi utilizado o programa *CorelDraw 10®*. Estas seções foram salvas com ganho AGC de 60 ns para uma melhor visualização.

Foram marcados dois refletores (marrom e lilás) em cada uma das seções escolhidas e algumas falhas. A seguir serão mostradas as cinco seções processadas com as respectivas seções interpretadas.

Pode-se observar que:

- ❖ Na seção 1 (Figura 24) encontra-se uma estrutura em flor abaixo do refletor lilás. Identifica-se também a estrutura de um gráben que desloca os dois refletores delineados;
- ❖ A seção 5 (Figura 26) possui a mesma estrutura em flor encontrada na seção anterior (Figura 24) e ainda, outra estrutura em flor abaixo do refletor lilás. Não é possível visualizar o gráben tão bem quanto na seção 1 (Figura 24) porém, ainda encontram-se resquícios dele. Os dois ramos do refletor marrom se juntam, formando um só;
- ❖ Na seção 10 (Figura 28) o refletor lilás está falhado e são visualizadas mais falhas do que nas seções anteriores (Figuras 24 e 26) e mais estruturas em flor;
- ❖ Na seção 15 (Figura 30) o refletor marrom se desmembra novamente, também identificam-se estruturas em flor e o refletor lilás continua falhado; e
- ❖ Na seção 18 (Figura 32) os refletores não estão mais deslocados e aparentemente diminui a quantidade de falhas.

Seção 1

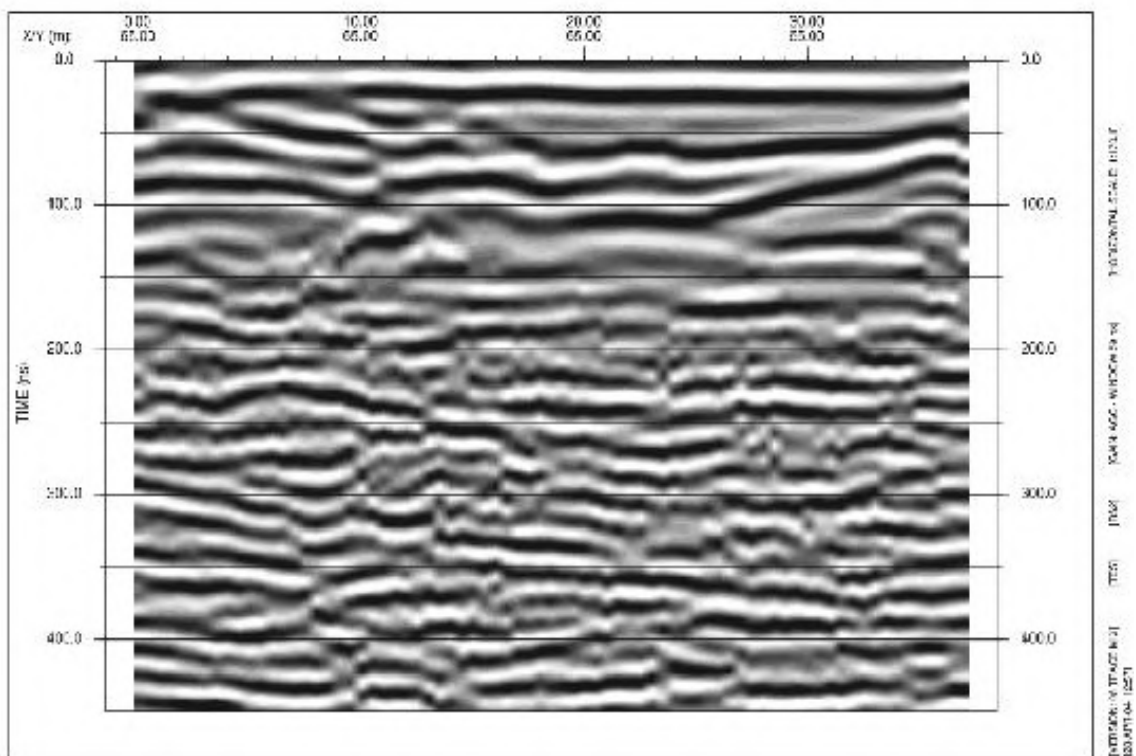


Figura 23: Seção 1 processada sem interpretação.

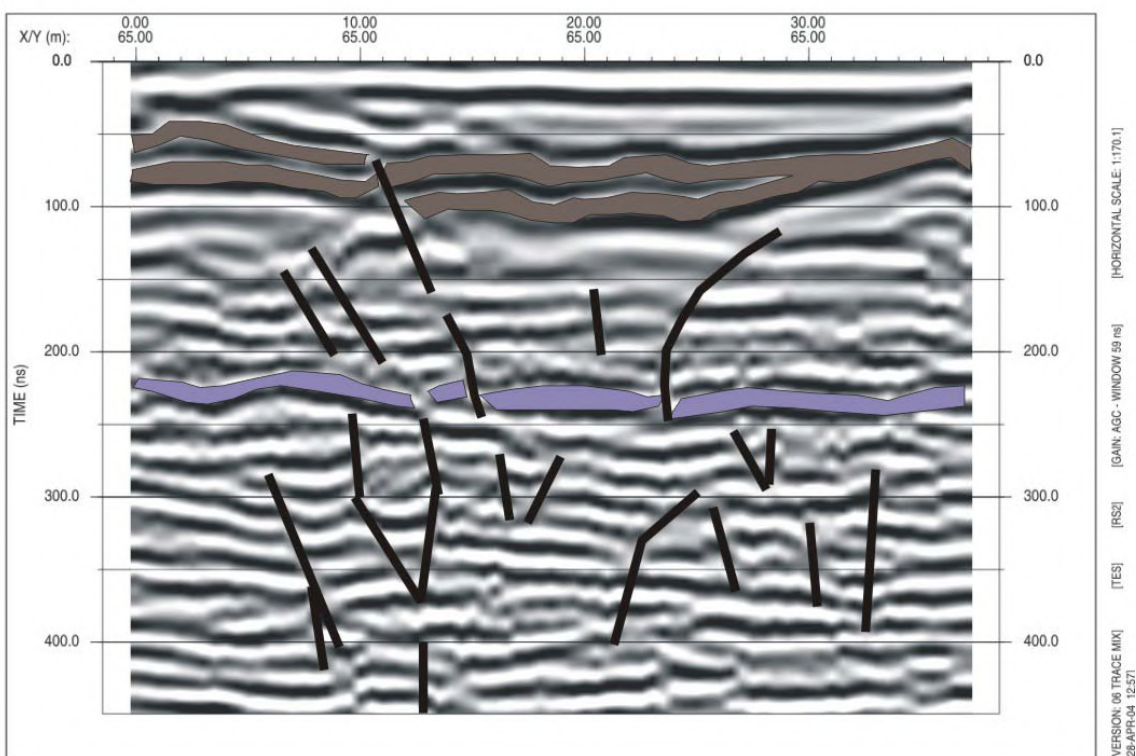


Figura 24: Seção 1 processada com interpretação.

Seção 5

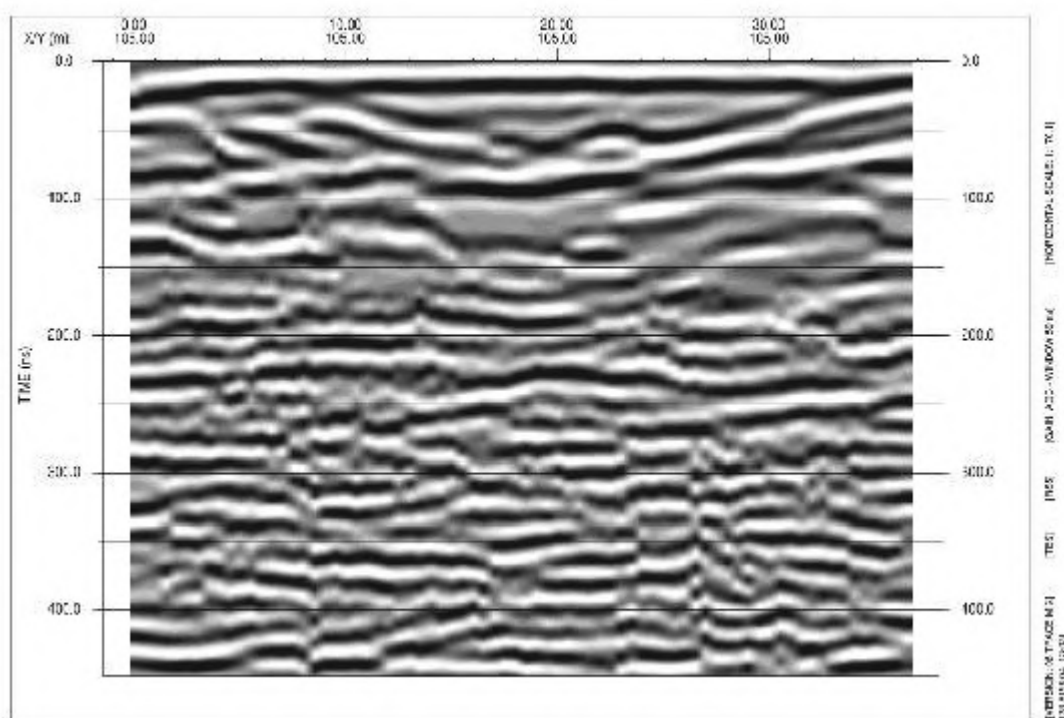


Figura 25: Seção 5 processada sem interpretação.

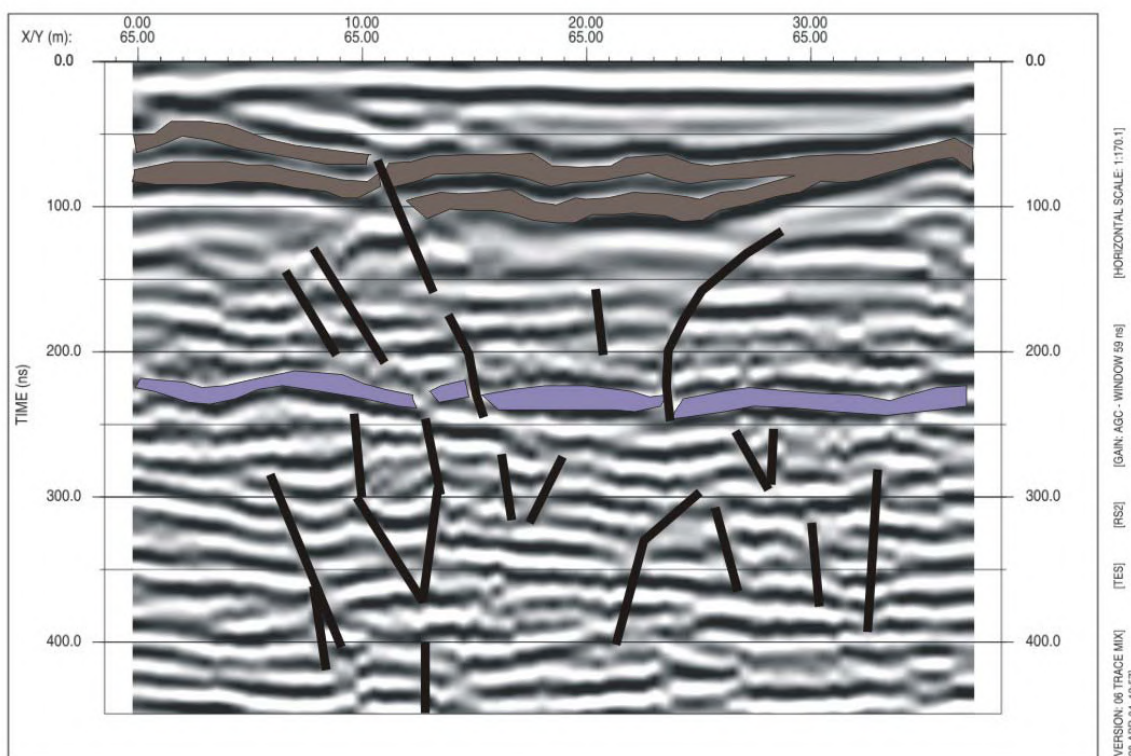


Figura 26: Seção 5 processada com interpretação.

Seção 10

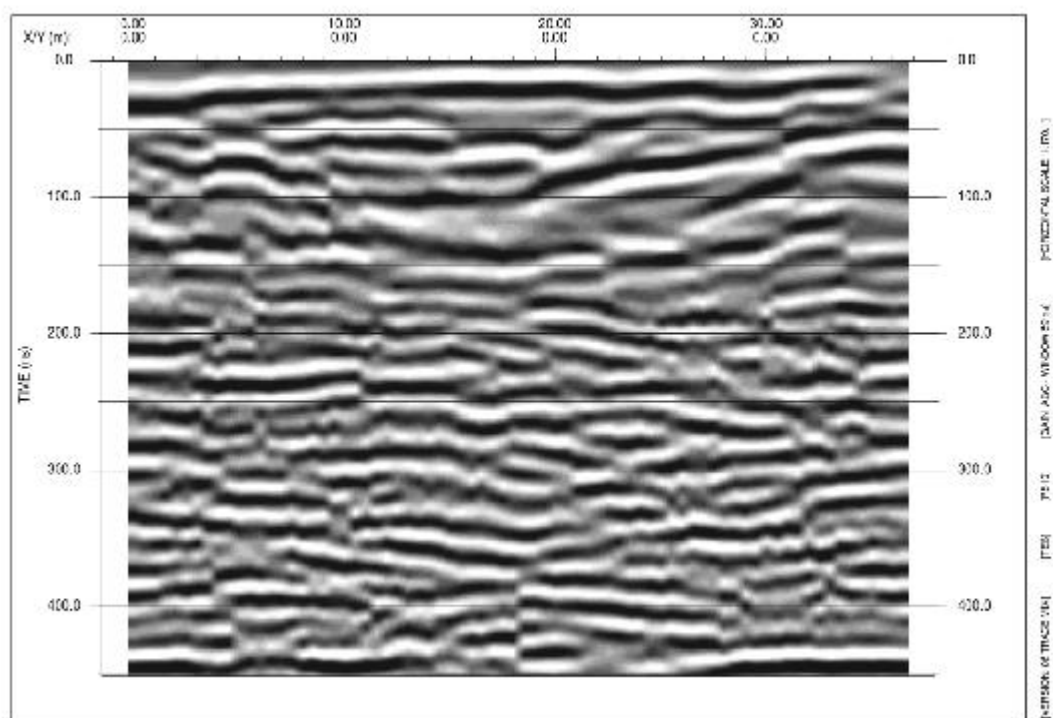


Figura 27: Seção 10 processada sem interpretação.

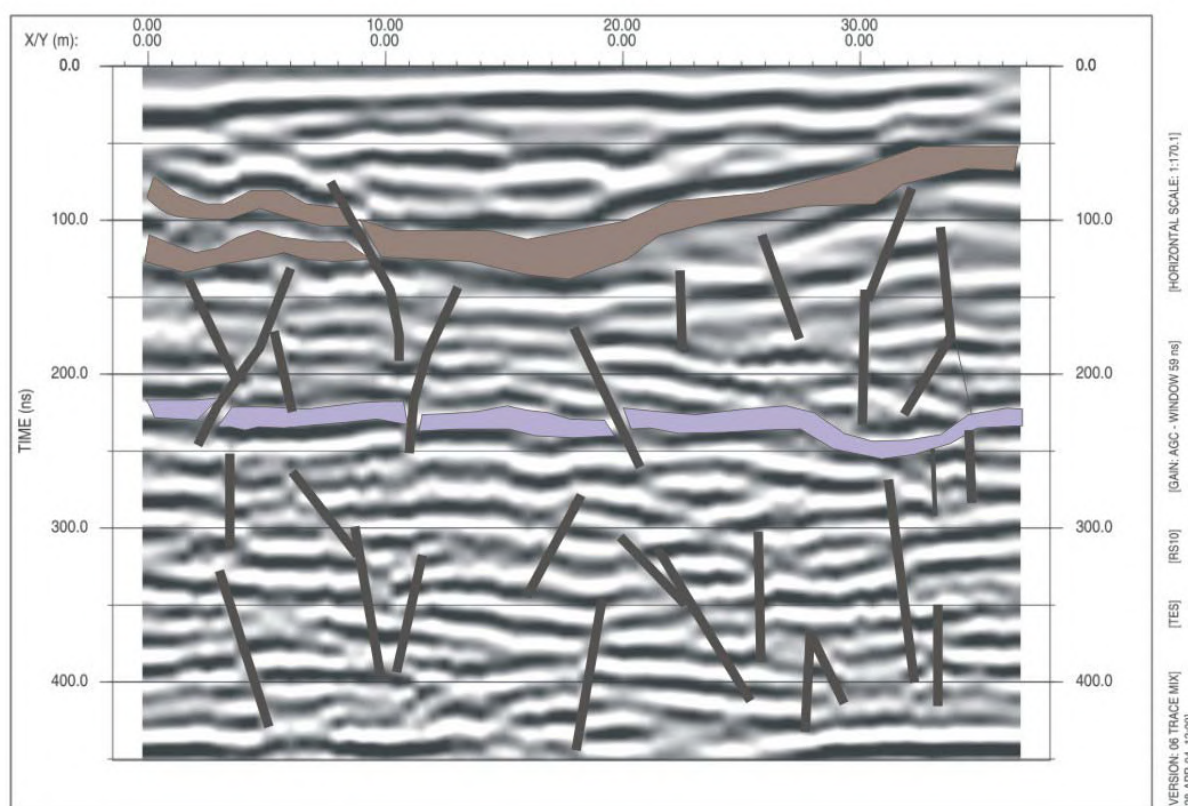


Figura 28: Seção 10 processada com interpretação.

Seção 15

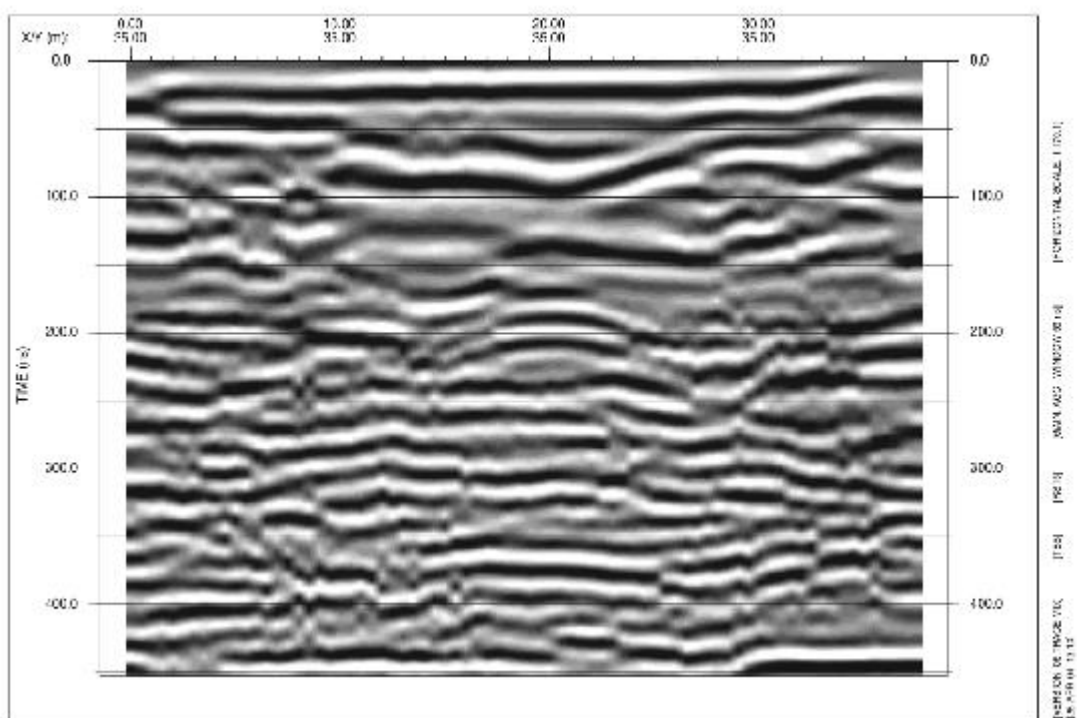


Figura 29: Seção 15 processada sem interpretação.

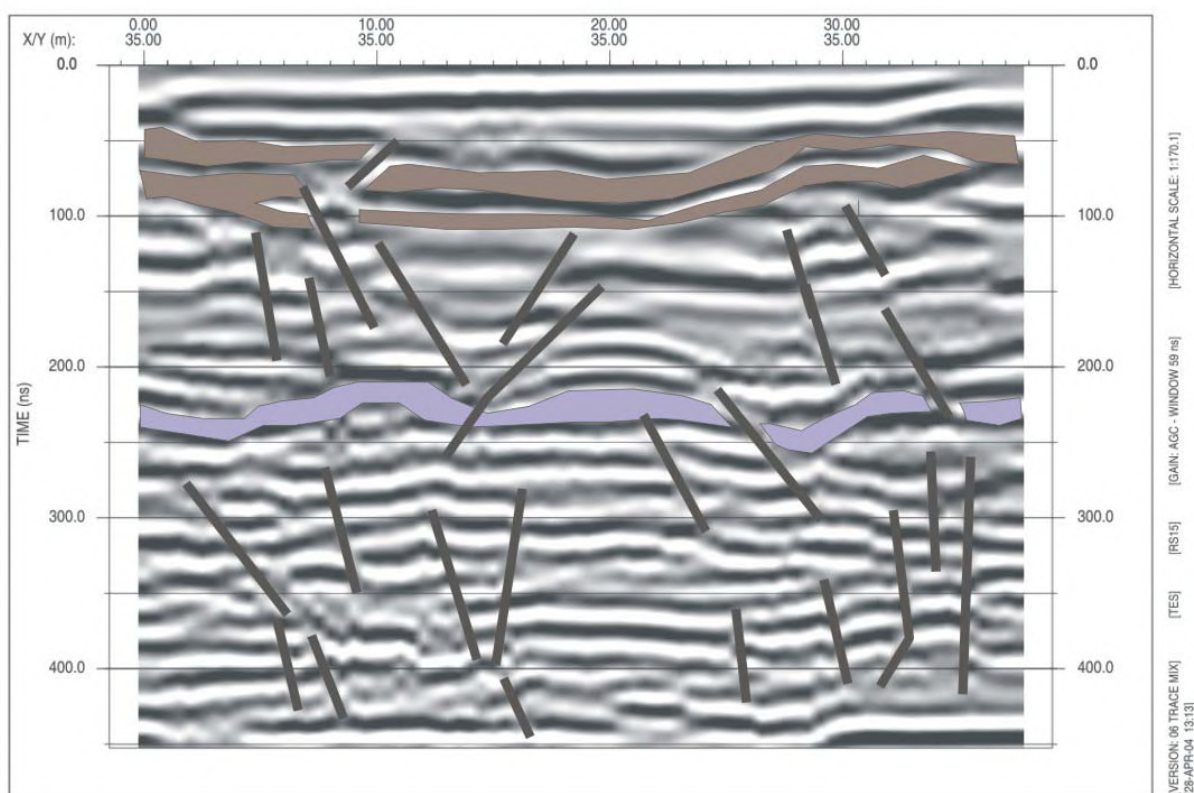


Figura 30: Seção 15 processada com interpretação.

Seção 18

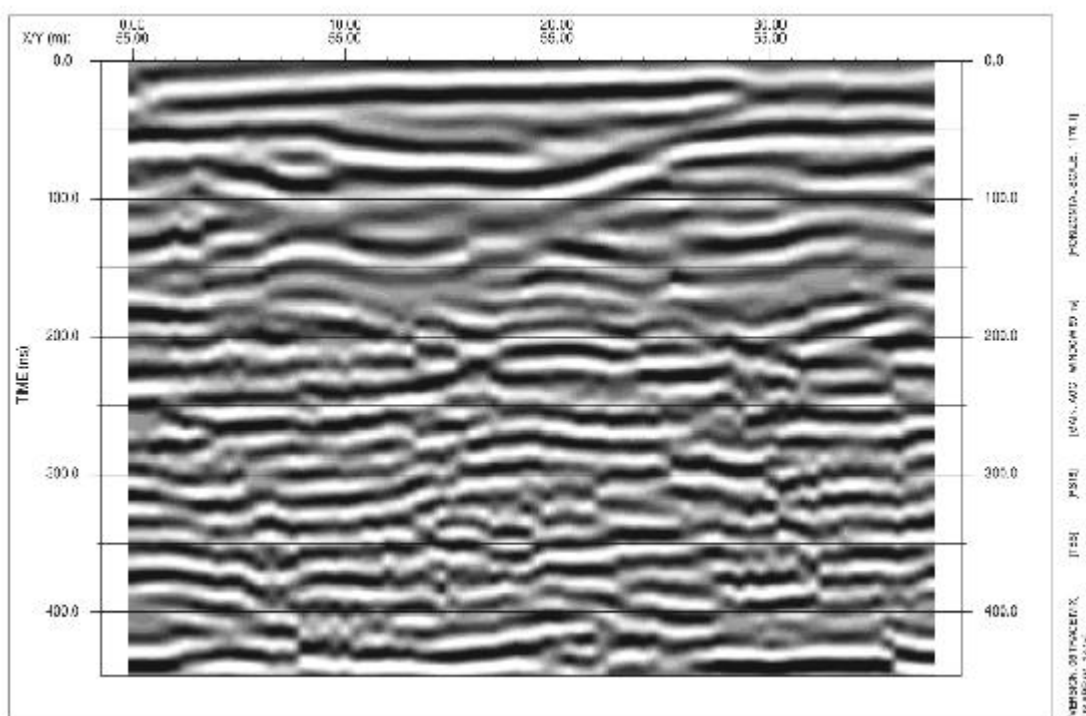


Figura 31: Seção 18 processada sem interpretação.

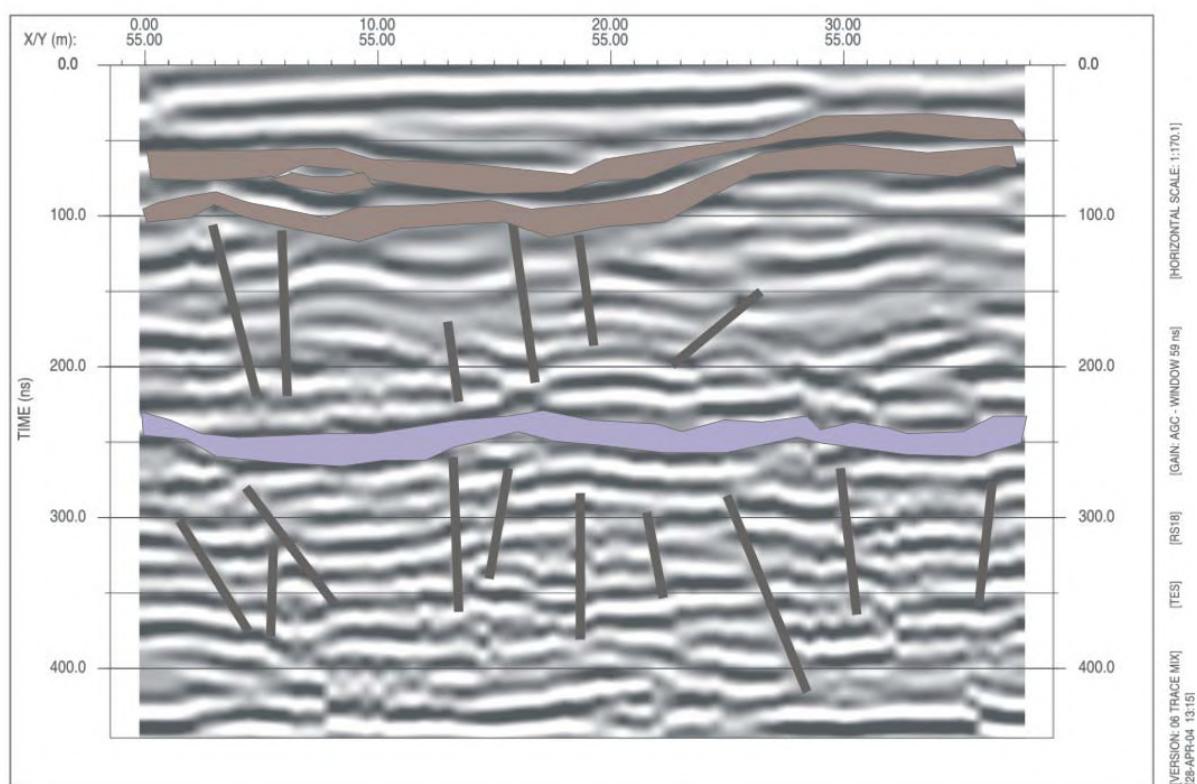


Figura 32: Seção 18 processada com interpretação.

Não foi possível fazer uma conexão entre as falhas e montar um modelo tridimensional para caracterizar sua geometria, pois elas aparecem difusas ao longo das seções. Isto se dá pelo fato de que o gráben descrito por Ramos (2002), através de estudos estratigráficos e estruturais, não tem continuidade ao longo do afloramento, a densidade de falhas vai diminuindo conforme vamos interiorizando o afloramento, como pode ser visualizado na seção 18 (Figura 32). Este fato também observado por Araújo (2003) no levantamento realizado no mesmo afloramento.

Entretanto, os refletores delineados são bem visíveis, podendo-se ter uma visualização tridimensional ao colocar as linhas em posições paralelas, como mostra a Figura 33.

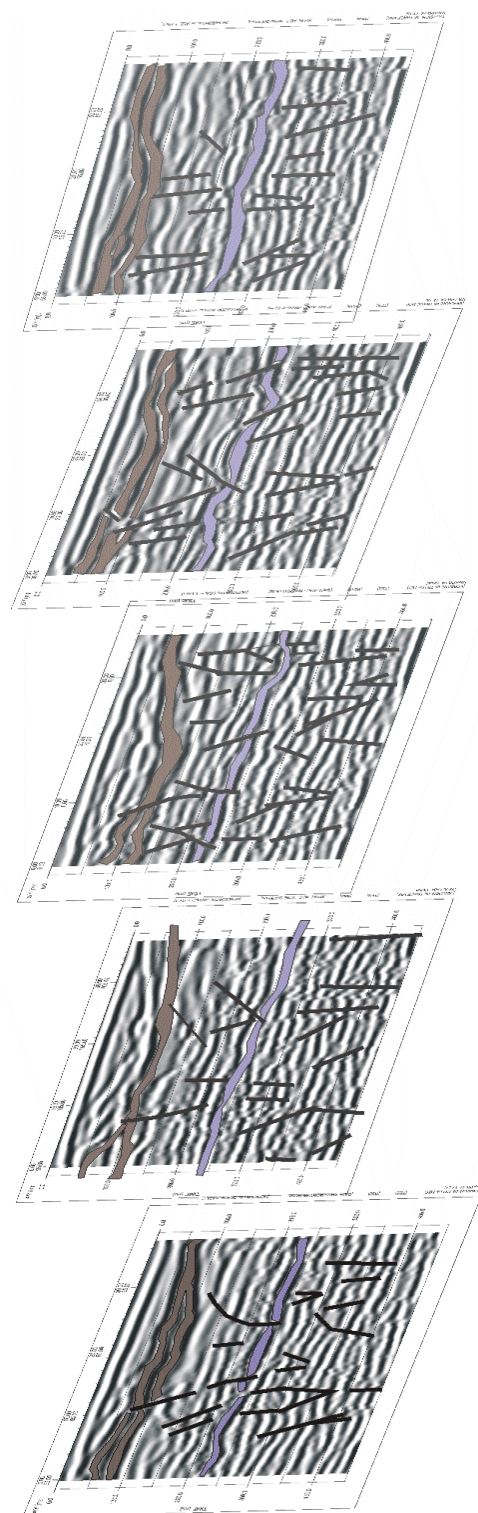


Figura 33: *Visualização das cinco linhas interpretadas colocadas em posições paralelas.*

7 CONCLUSÃO

Neste estudo pode-se verificar que:

- ❖ como era esperado, o uso da antena de 50 MHz possibilitou visualizar falhas localizadas em profundidades maiores do que as falhas observadas por Araújo (2003), que utilizou antenas de 100 Mhz para o estudo deste mesmo afloramento;

- ❖ ao realizar o processamento, pode-se obter melhores informações, sendo possível delinear os refletores, e assim, associá-los nas seções interpretadas;

- ❖ ao longo do interior do afloramento, as falhas vão diminuindo, como pode ser visualizado na seção 18 (Figura 32), onde foram delineadas poucas falhas;

- ❖ não foi possível fazer uma correspondência das falhas nas seções, impossibilitando realizar um arranjo tridimensional para definir a geometria;

- ❖ através dos resultados obtidos pode-se notar que o GPR é uma boa metodologia para determinação de estruturas em afloramentos.

- ❖ Pode-se associar algumas falhas destas seções aos eventos descritos por Riccomini (1989): as falhas do gráben delineadas na seção 1 (Figura 24) pertencem ao tectonismo extencional NNW-SSE associada ao evento 1 (E1). As estruturas em flor que foram encontradas em todas as seções interpretadas podem ser associadas aos eventos 2 e 3, relativos às transcorrências.

É necessário que se dê continuidade a este estudo utilizando antenas com frequências variadas na tentativa de definir a real geometria das falhas deste afloramento, e assim realizar uma comparação de resultados.

8 REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- ALBUQUERQUE, A. (2001). Análise dos Padrões de Fraturamento Neotectônico e a Sua Possível Aplicação na Avaliação Hidrogeológica da Bacia Sedimentar de Resende. Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, estágio de campo IV, 61p.
- ALMEIDA, F. F. M. (1976). The System of Continental Rifts Bordering the Santos Basin, Brazil. Acad. Bras. Ciênc., 48 (suplemento): 15-26.
- AMADOR, E. S. (1975). Estratigrafia e sedimentação na Bacia de Resende – RJ. Acad. bras. Ciênc. (Supl.): 181-223.
- AMADOR, E. S.; ANTUNES, R. L.; PAIXÃO, R. A. (1978). Notas Complementares sobre a Estratigrafia dos Depósitos Cenozóicos da Bacia de Resende. Acad. Bras. Ciênc., 50: 122-123.
- ANNAN, A. P. (1992). Ground Penetrating Radar. Workshop notes. Sensors and Software. Inc., Tokio. Copyright 2000.
- ARAÚJO JR. Z. A. (2003). Levantamento e processamento de dados de radar de penetração no solo (GPR) em um afloramento da Bacia de Resende/RJ. Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, estágio de campo IV, 48p.
- ASMUS; H. E. & FERRARI, A. L. (1978). Hipótese sobre a Causa do Tectonismo Cenozóico da Região Sudeste do Brasil. Projeto REMAC N:4, p. 75-88.
- CASTRO, F. G. (2000). Caracterização Hidrogeológica e Hidroquímica da Bacia Sedimentar de Resende (RJ). Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, dissertação de mestrado, 130p.
- CORDANI, U. G., DELHAL, J., LEDENT, D. (1973). Orogèneses superposées dans le Précambrien du Brésil Sud-Oriental. (États de Rio de Janeiro et Minas Gerais). Rev. Brasileira de Geografia. ,v.3,n.1,p.1-22.
- DAVIS, J.L.; ANNAN, A.P. (1989). Ground-penetrating radar for high-resolution mapping of soil and rock stratigraphy. Geophysical Prospecting, v.37, n.5, p.531-551.
- Rodrigues, L. H. O. 2004. Levantamento Geofísico com Radar de Penetração no Solo (GPR) Visando Caracterização Estrutural em um Afloramento na Bacia de Resende – RJ. UFRJ.

- DIAS, G. A. N., ROCHA, P. F., GUIMARÃES, M., SILVA, J.C. (2003). Estudo de análogos de reservatório na Bacia de Resende (Brasil) com dados de GPR e modelagem FDTD. 8th International Congress of The Brazilian Geophysical Society, Rio de Janeiro, Brazil.
- DUARTE, O. O. (1997). Dicionário enciclopédico inglês-português de geofísica e geologia. 1ªed. Rio de Janeiro:PETROBRÁS, 304p.
- GATTO, L. C. S.; RAMOS, V. L. S.; NUNES, B. T. A.; MAMEDE, L.; GÓES, M. H. B.; MAURO, C.A.; ALVARENGA, S. M.; FRANCO, E. M. S.; QUIRICO, A F. & NEVES, L. B. (1983). Geomorfologia. In PROJETO RADAMBRASIL, v.32, Brasília, DNPM, p.305-384.
- HASUI, Y., CARNEIRO, C. D. R., COIMBRA, A. M. (1975). The Ribeira Folded Belt. Revista Brasileira de Geociências. São Paulo: , v.5, p.257 – 266.
- HASUI, Y. & PONÇANO W.L. (1978). Organização Estrutural e evolução da Bacia de Taubaté. Na.XXX Congr. Bras. Geol., Recife, 1:368-381.
- MACEDO, J. (1989). Evolução Tectônica da Bacia de Santos e Áreas Continentais Adjacentes. B. Geoci. PETROBRÁS, Rio de Janeiro, 3 (3):159-173.
- MALAGUTTI, W.F.; BRAGA, A. C. O; DOURADO J. C.; JÚNIOR, J. C. R. L. (2000). Emprego de métodos geofísicos na caracterização e análise ambiental do aterro sanitário de Jundiaí (SP). Geociências, UNESP, v.19, n.1, p.123-132.
- MELLETT, J. S. (1995). Ground penetrating radar applications in engineering, environmental management, and geology. Journal of Applied Geophysics, n.33, p.157-166.
- MELO, M. S. *et al.* (1983). Estudo Geológico-Tectônicos na Bacia de Resende (RJ) e sedimentos terciários da área de Volta Redonda (RJ) e Bacia de Taubaté (área de Cruzeiro, SP). São Paulo, DMGA, 2v. (IPT.Relatório, 17737).
- MELO, M. (1985). Estruturas da Área da Bacia de Resende (RJ) e os Modelos Tectônicos Regionais. Atas do 5º Simpósio Regional de Geologia, SBG/SP, São Paulo, v.1
- MELO, M. S.; RICOMMINI, C.; ALMEIDA, F. F. M.; HASUI, Y. (1985). Sedimentação e Tectônica da Bacia de Resende-RJ. Acad. bras. Ciênc., Rio de Janeiro, 57(4):467-479.
- Rodrigues, L. H. O. 2004. Levantamento Geofísico com Radar de Penetração no Solo (GPR) Visando Caracterização Estrutural em um Afloramento na Bacia de Resende – RJ. UFRJ.

- RAMOS, R. R. C. (1997). Estratigrafia da Sucessão Sedimentar Terciária da Bacia de Resende, entre Resende e Quatis (RJ), com Ênfase na Caracterização das Litofácies, Ciclicidade e Paleocorrentes. Instituto de Geociências, Universidade do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Dissertação de Mestrado. 209p.
- RAMOS, R.(2002). Sistemas Aluviais Terciários da Bacia de Resende/RJ. Análise de Fácies e Revisão estratigráfica. Instituto de Geociências, Universidade Federal Do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, tese de doutoramento.
- RICOMMINI, C. (1989). O Rift Continental do Sudeste do Brasil. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, tese de doutoramento, 256p.
- RICCOMINI, C.; APPI, C.; FREITAS, E.; ARAL, M. (1987). Tectônica e Sedimentação no Sistema de Rifts Continentais da serra do Mar (Bacias de Volta Redonda, Resende, Taubaté e São Paulo).Anais do I Simpósio de Geologia RJ-ES, Rio de Janeiro, 253-269.
- RODRIGUES, A. R.; PORSANI, J. L. (1997). Diferentes Litologias, Diferentes Situações,Diferentes Respostas.a Utilização do Método GPR como Ferramenta de Suporte à Geologia . In: 5o Congresso Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica,SãoPaulo-SP.p.540-543.
- SILVA,T. M.; MELLO, C. L.; MOURA, J. R. S. (1993). Compartimentação Morfoestrutural do Médio vale do Rio Paraíba do Sul e Áreas Serranas Adjacentes (RJ/SP/MG). In: SBG/Núcleo Rio de Janeiro e São Paulo, Simpósio de Geologia do Sudeste, 3, Rio de Janeiro. *Atas*, 103-109.

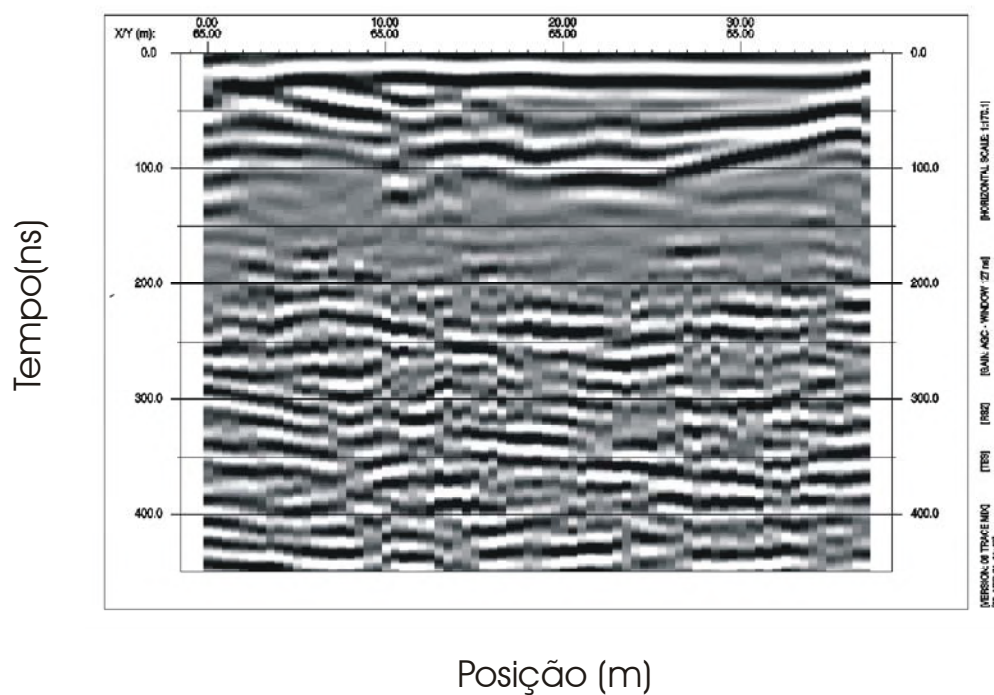
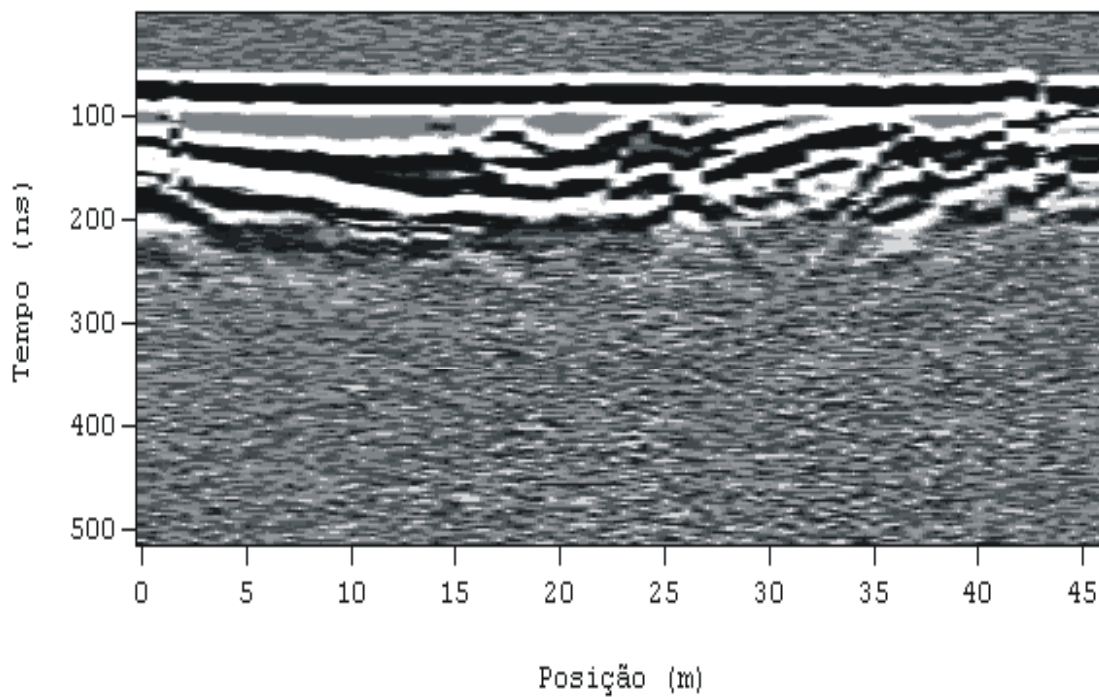
ANEXO I – SEÇÕES

Seções

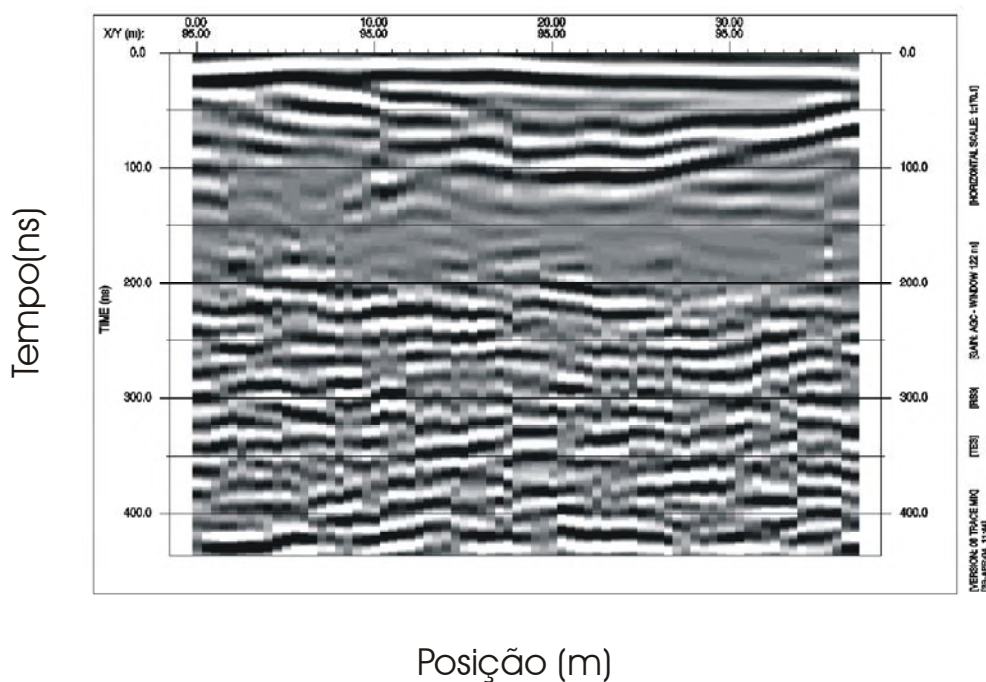
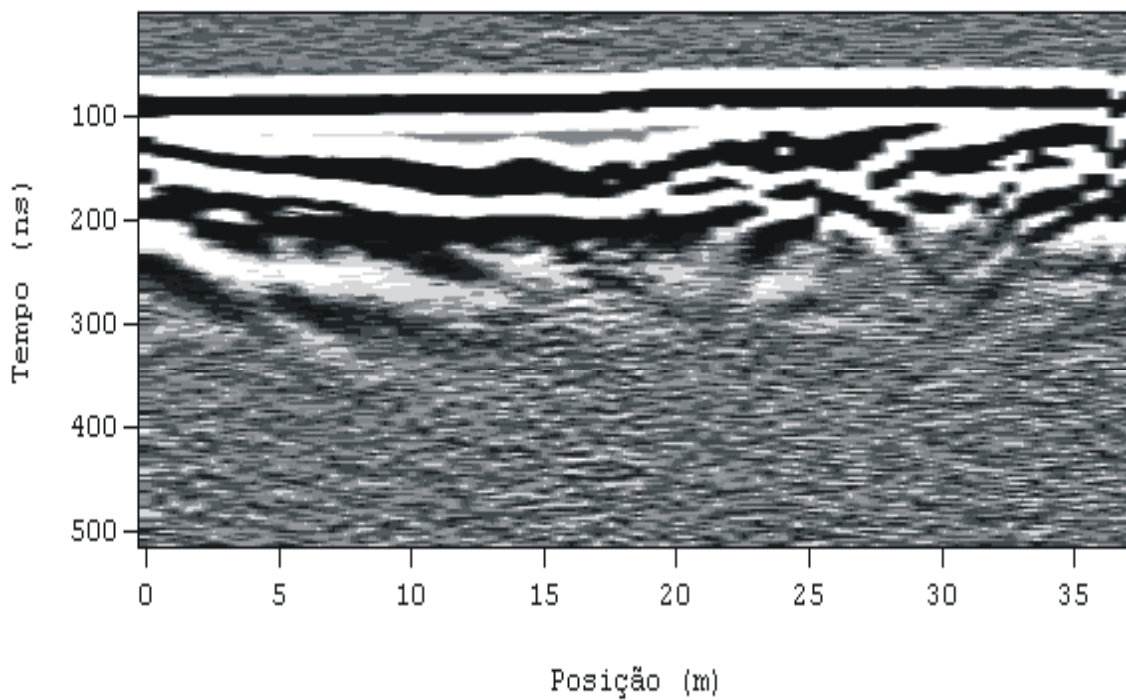
Neste anexo serão mostradas as vinte seções adquiridas. Serão expostas lado a lado as seções não processadas com suas respectivas seções processadas , estando todas num gráfico de distância X tempo.

Ao salvar a imagem final do processamento foi utilizado, em todas as linhas, o ganho AGC com o valor de aproximadamente de 124ns.

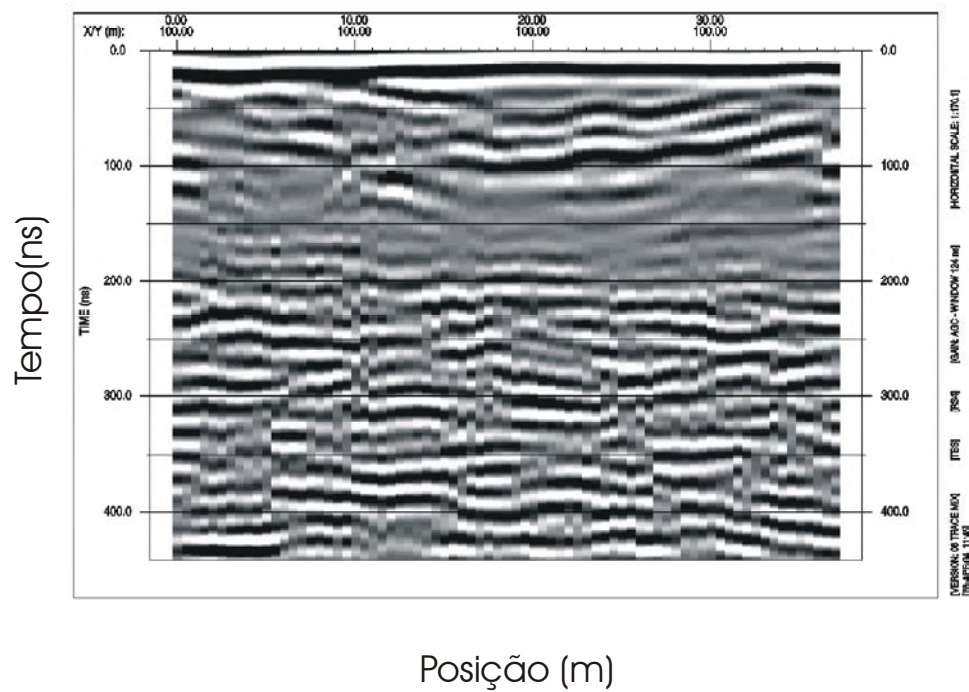
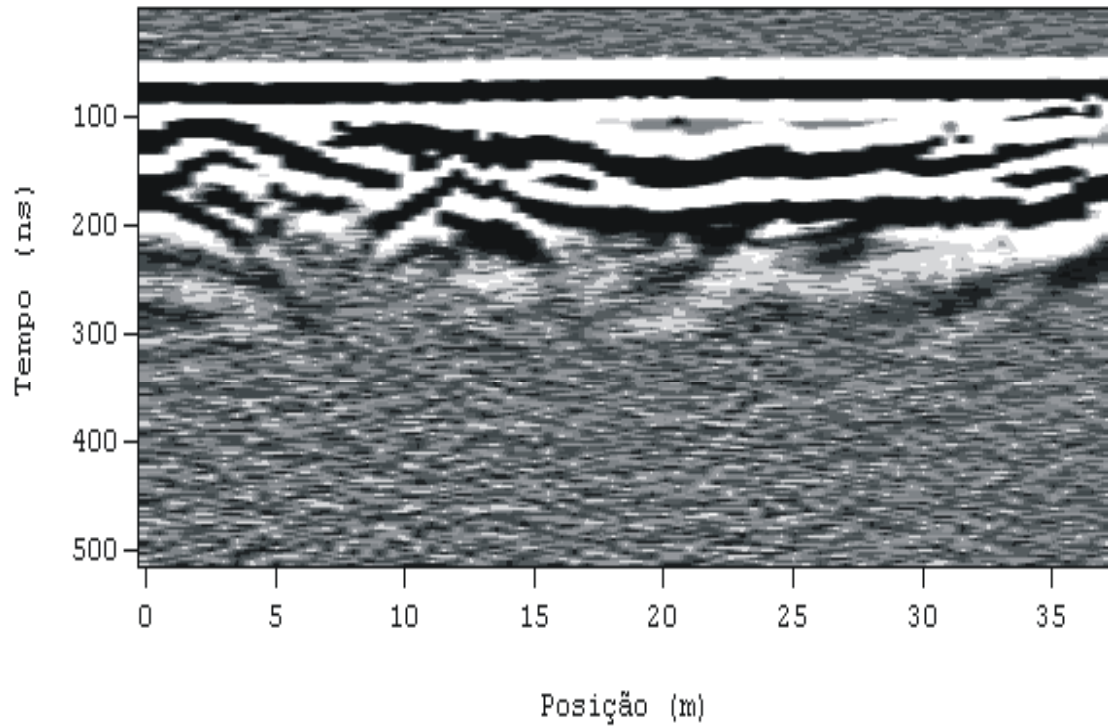
SEÇÃO 1



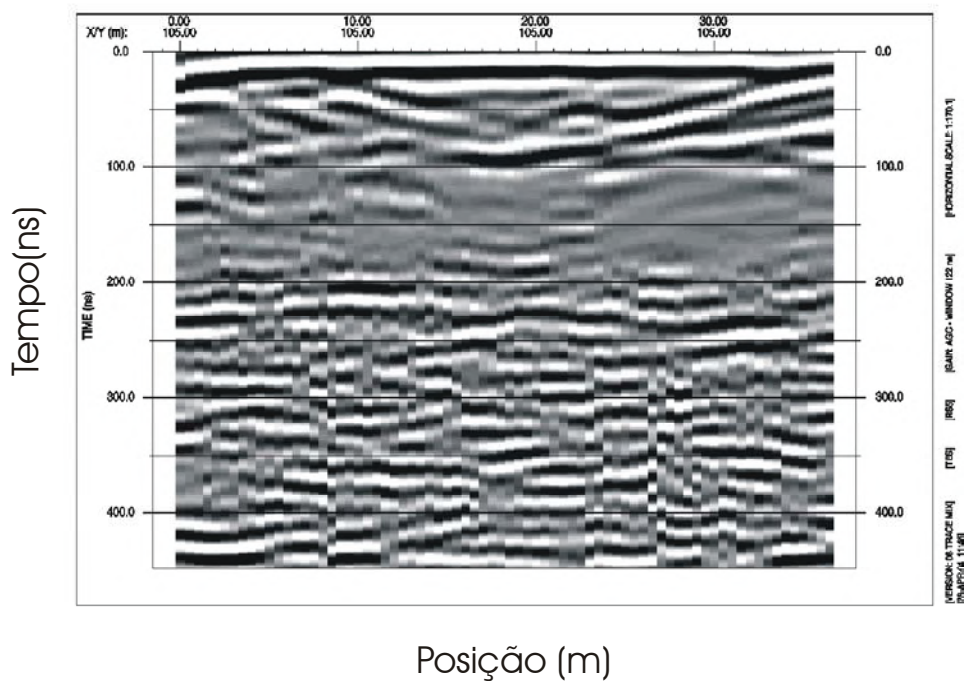
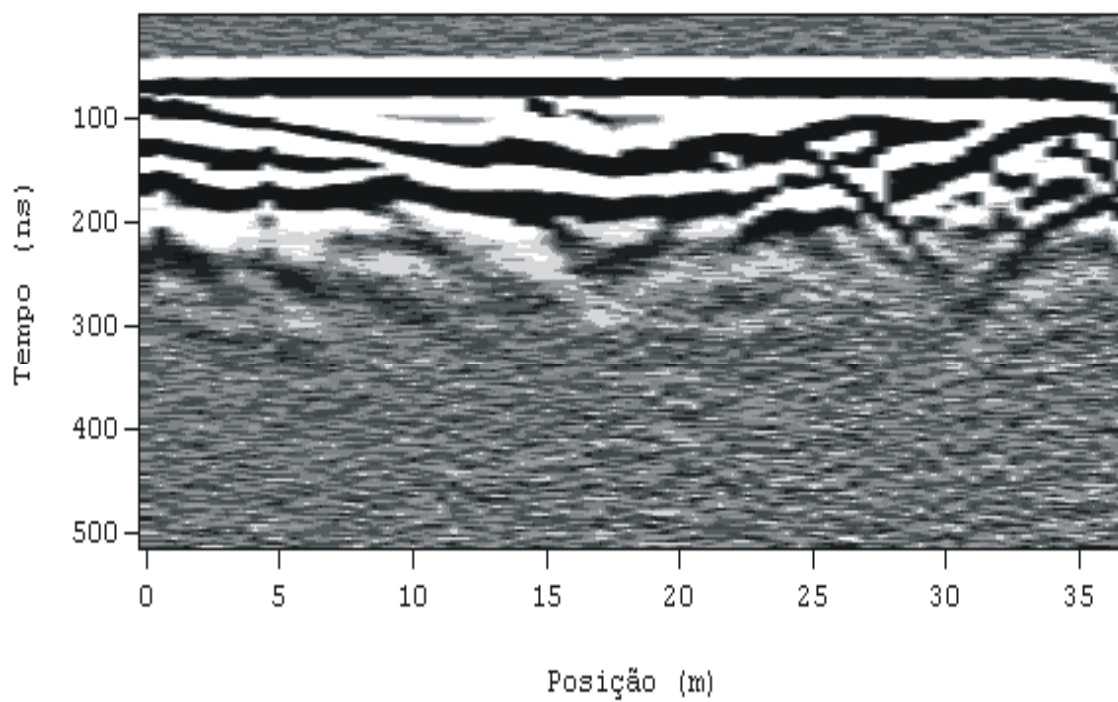
SEÇÃO 3



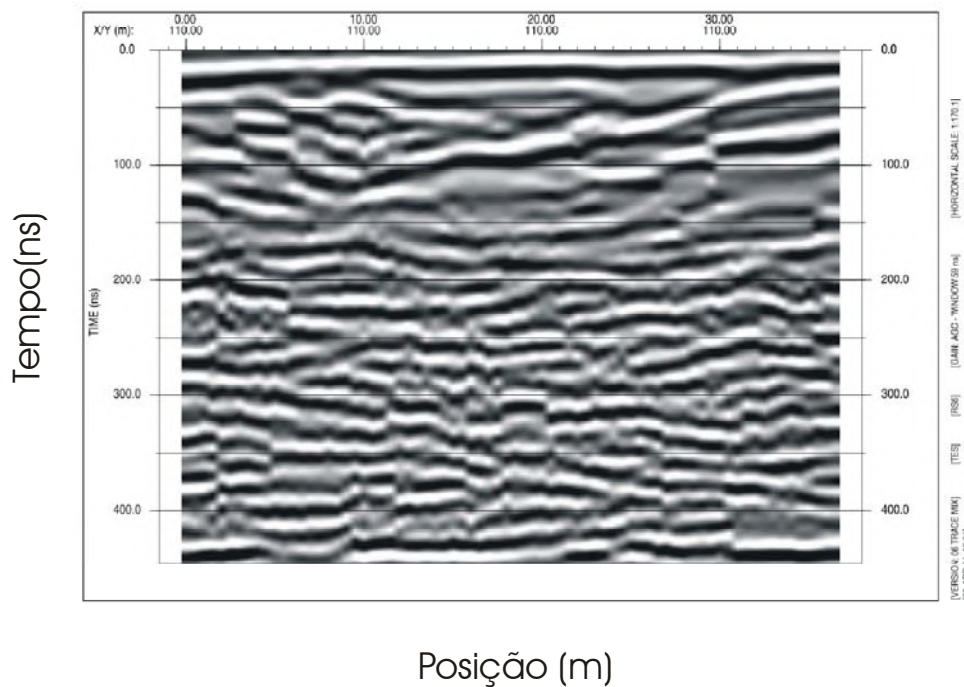
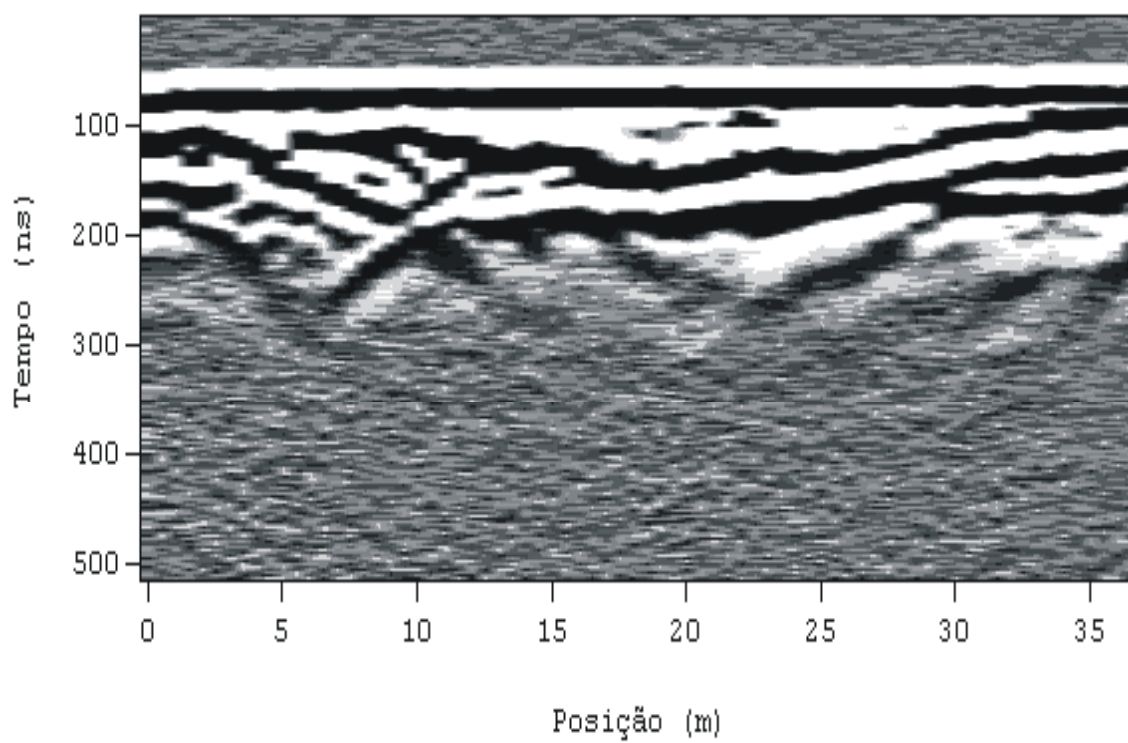
SEÇÃO 4



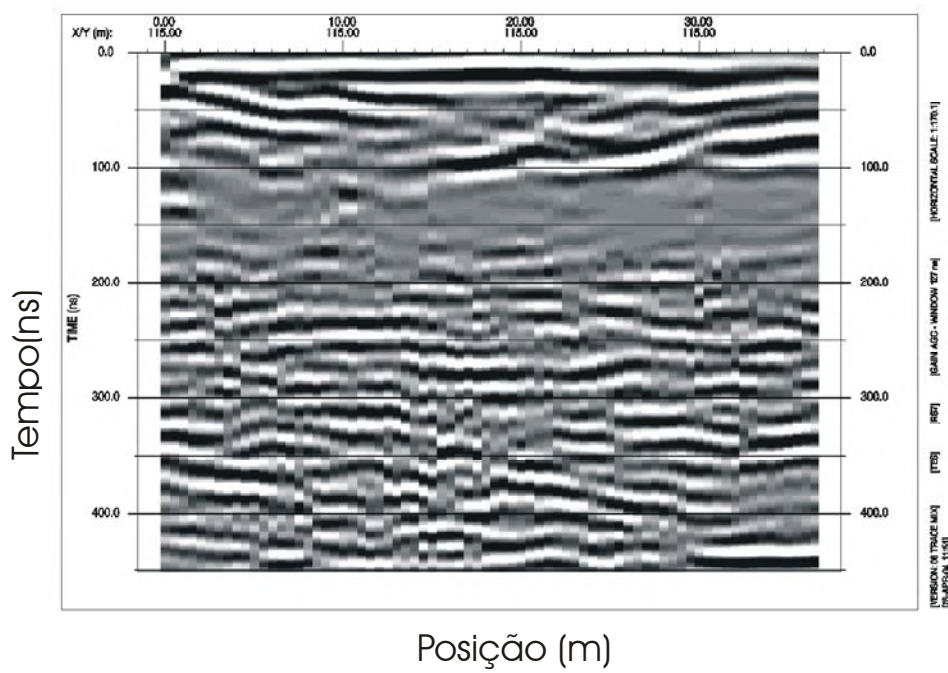
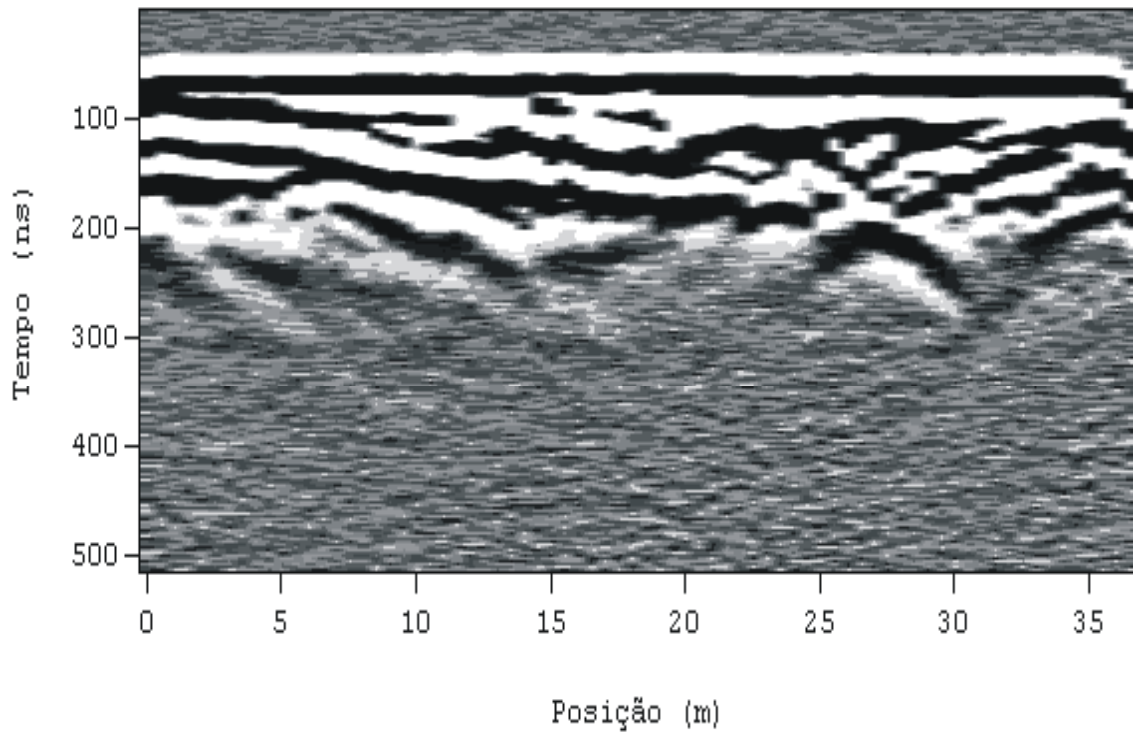
SEÇÃO 5



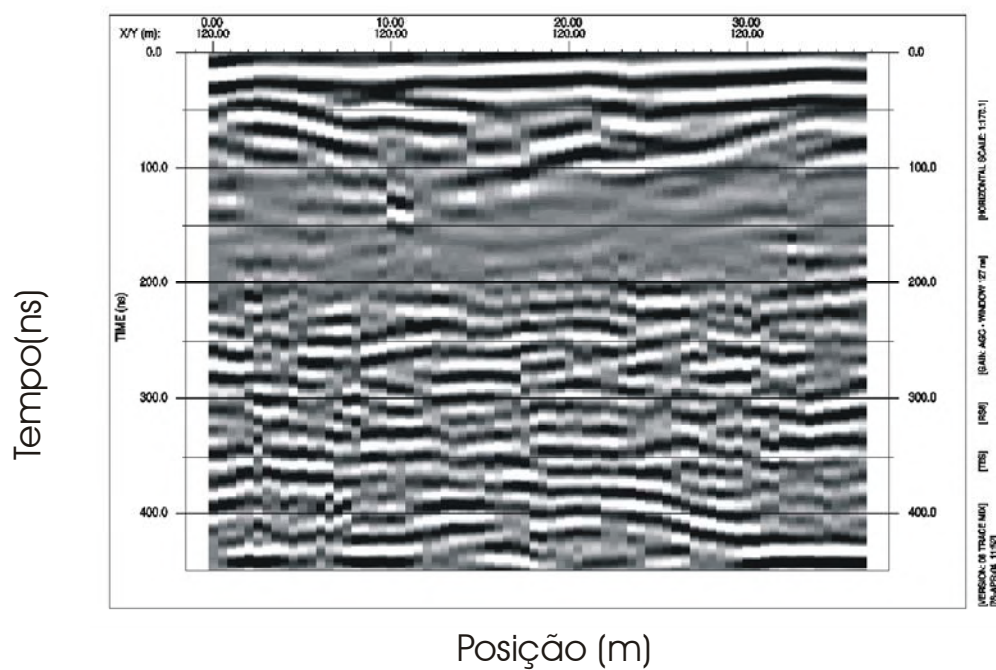
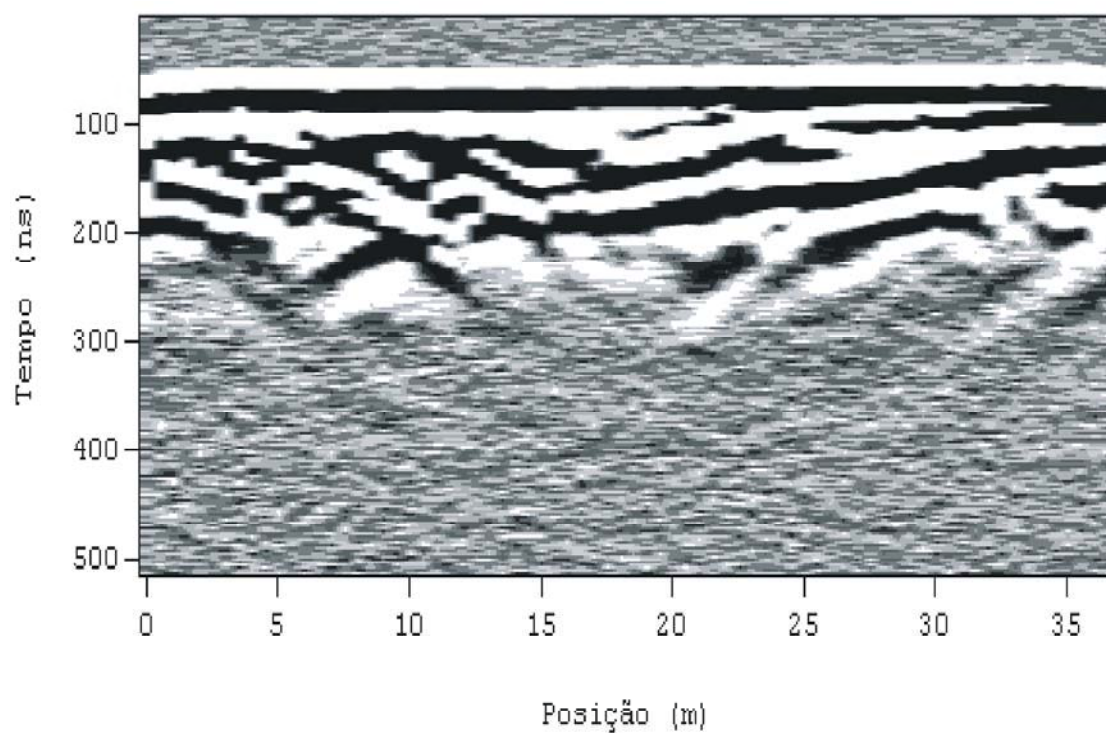
SEÇÃO 6



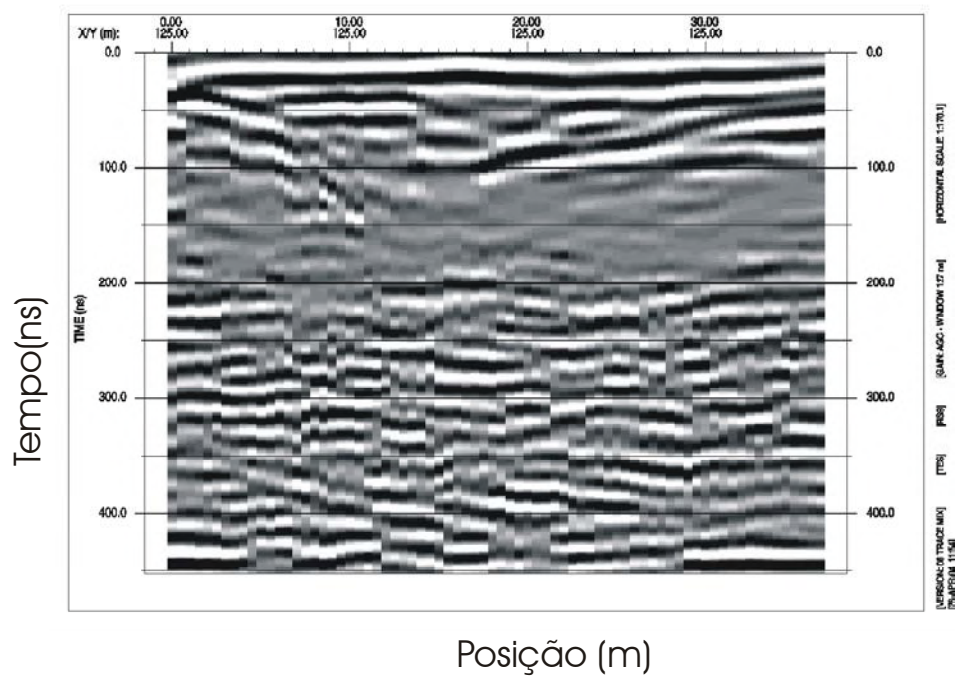
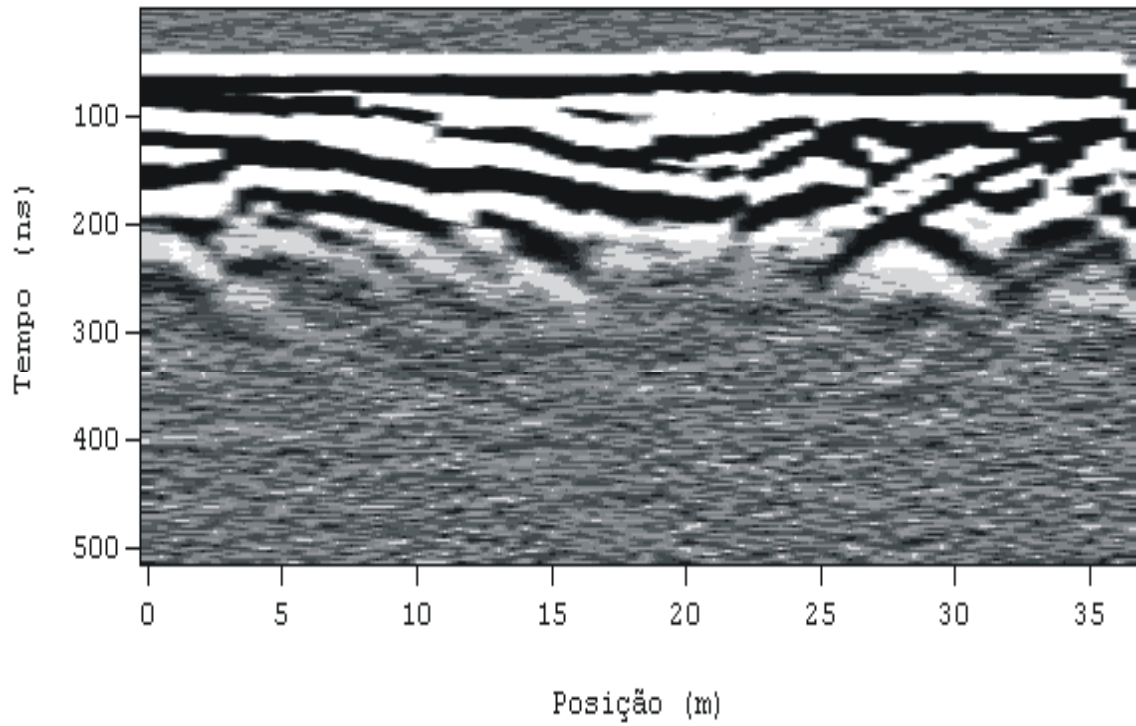
SEÇÃO 7



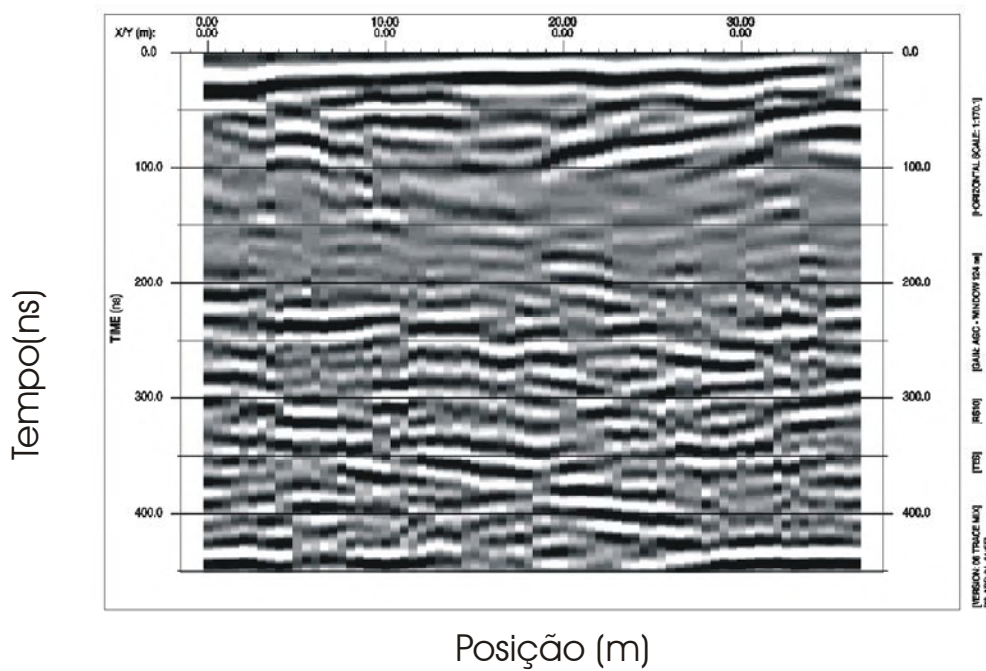
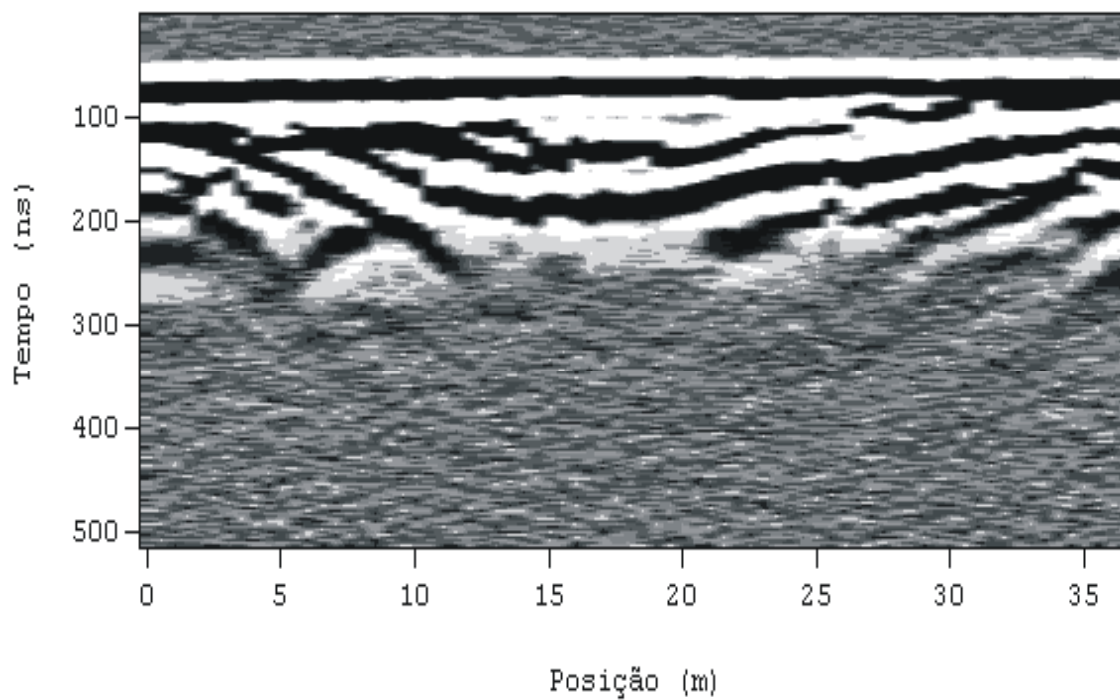
SEÇÃO 8



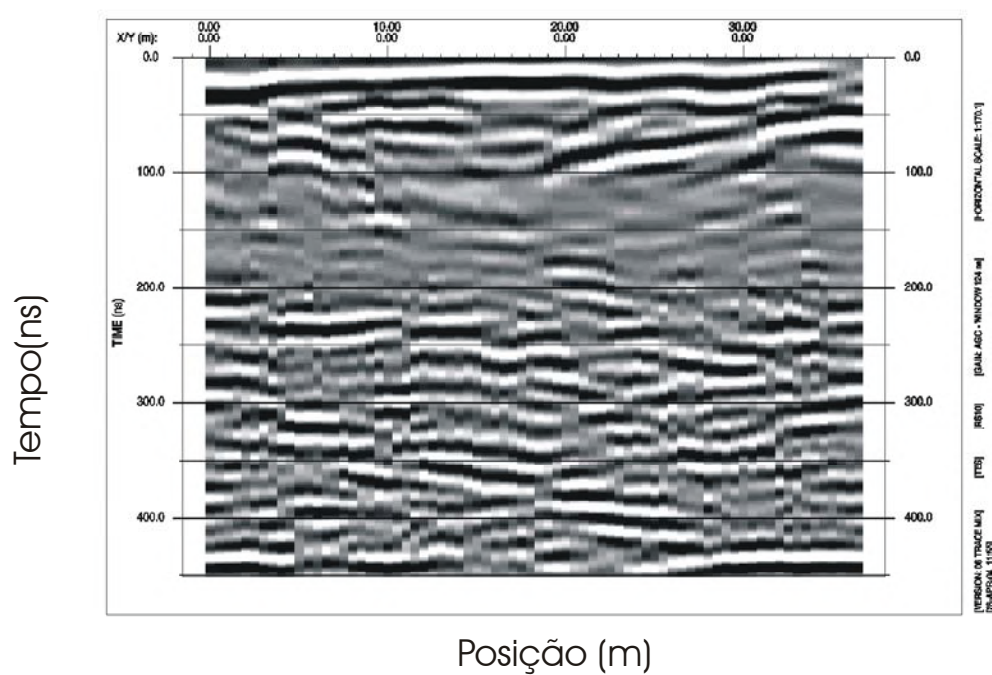
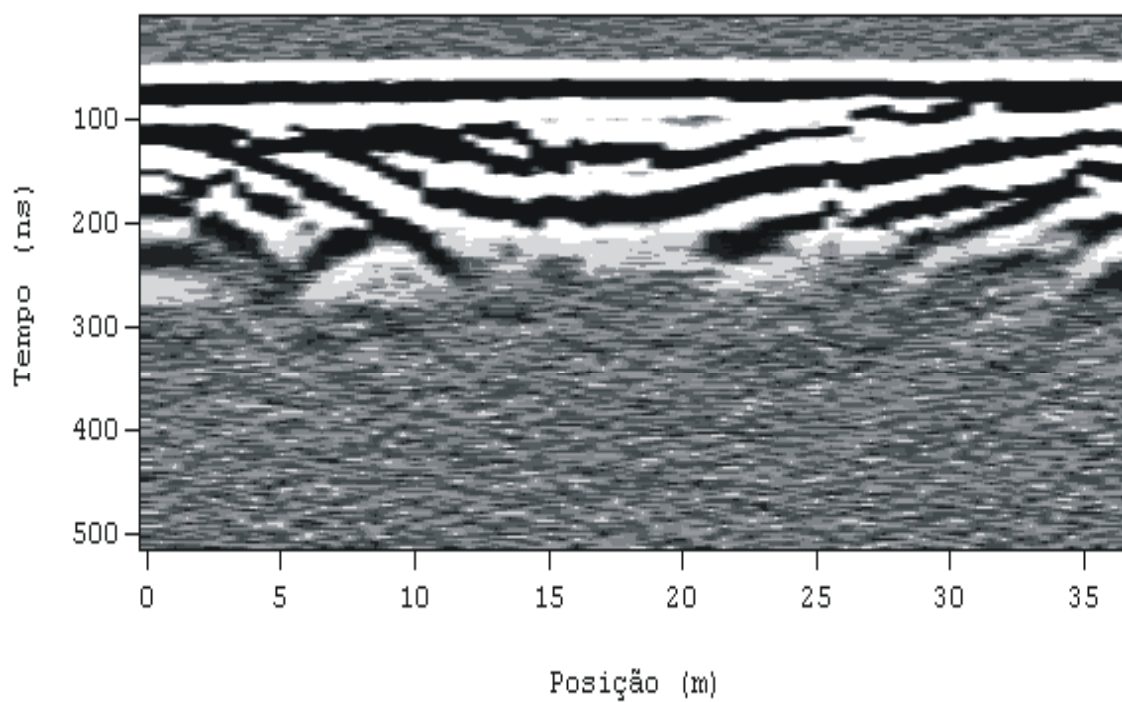
SEÇÃO 9



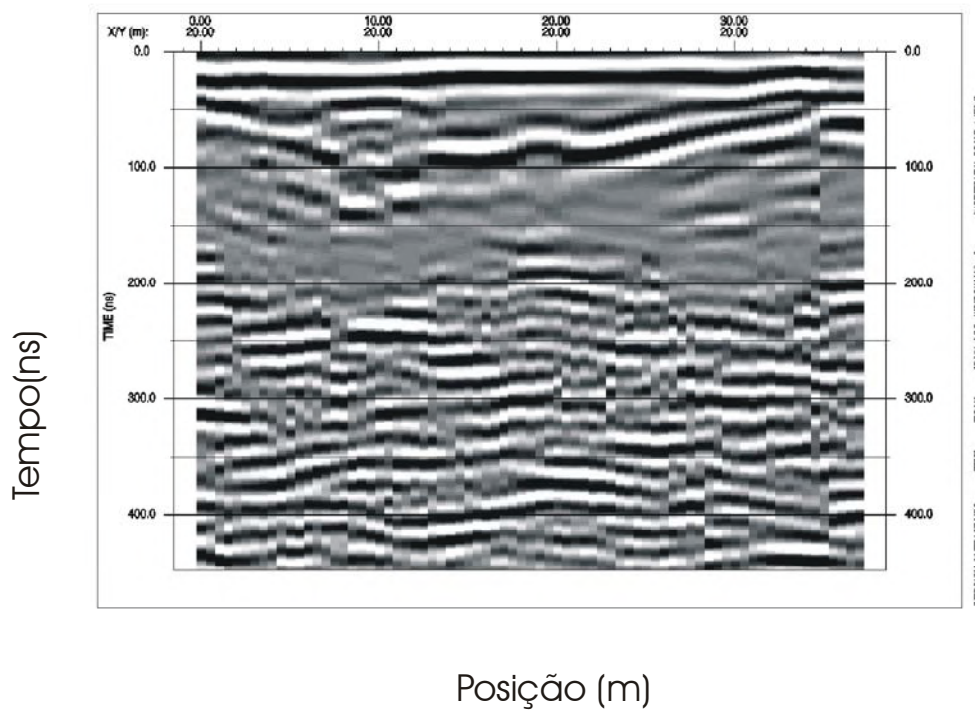
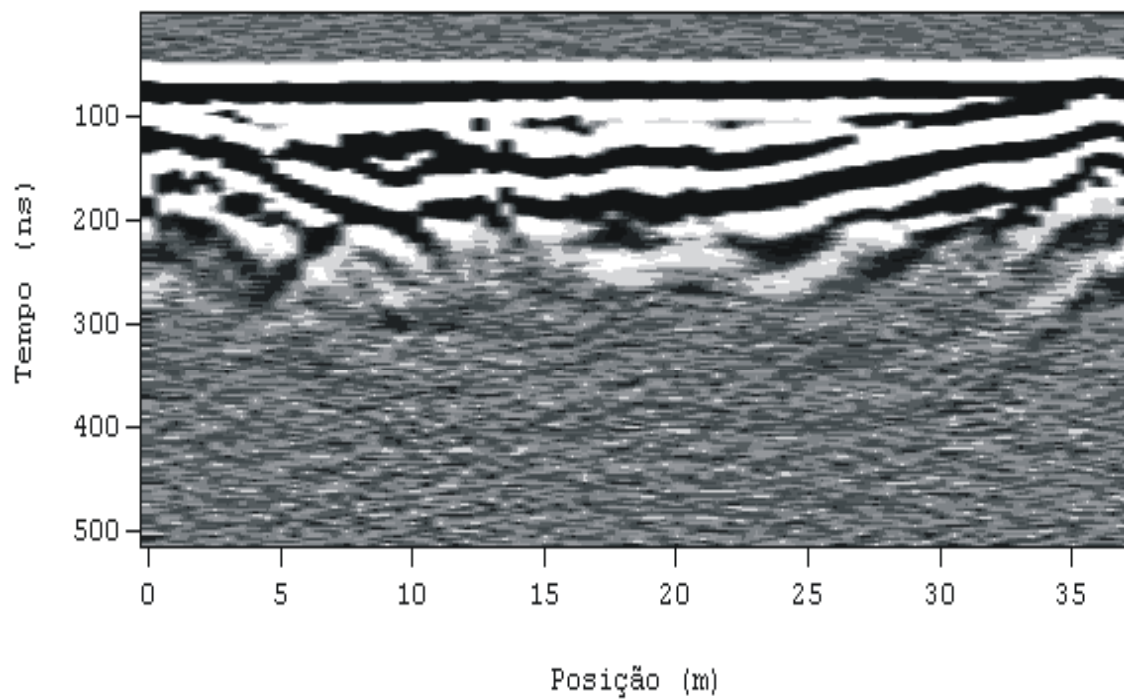
SEÇÃO 10



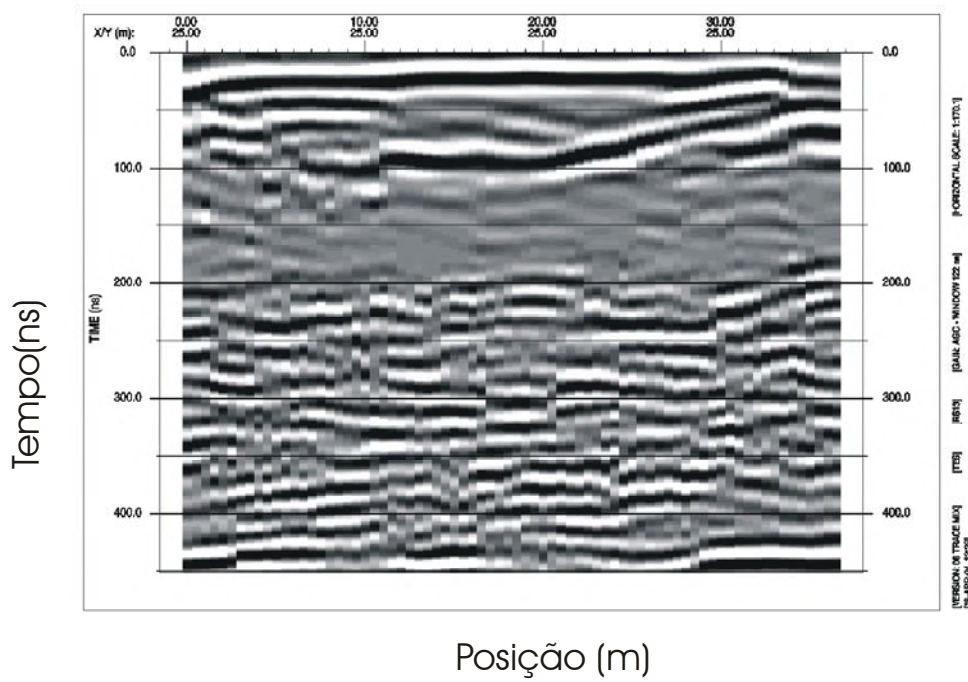
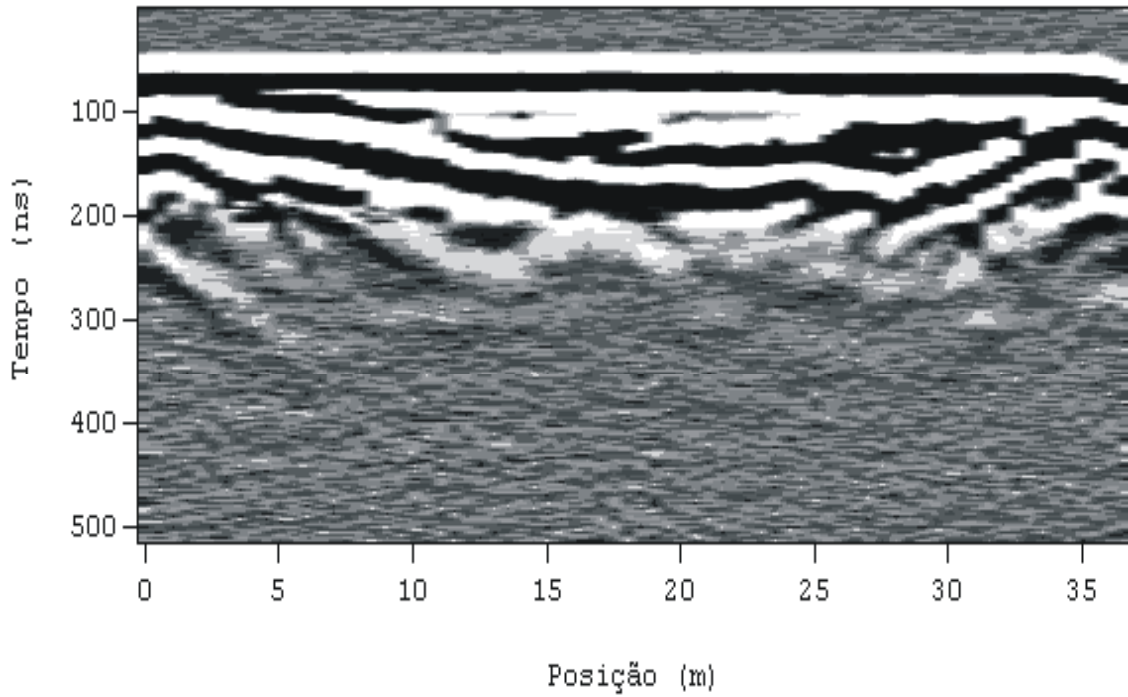
SEÇÃO 11



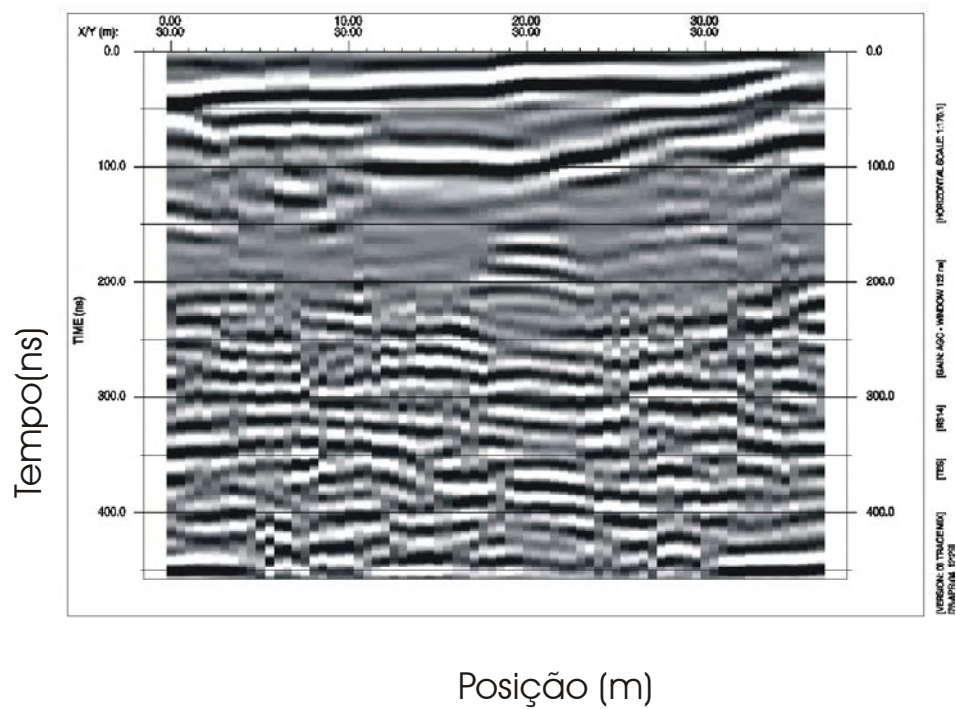
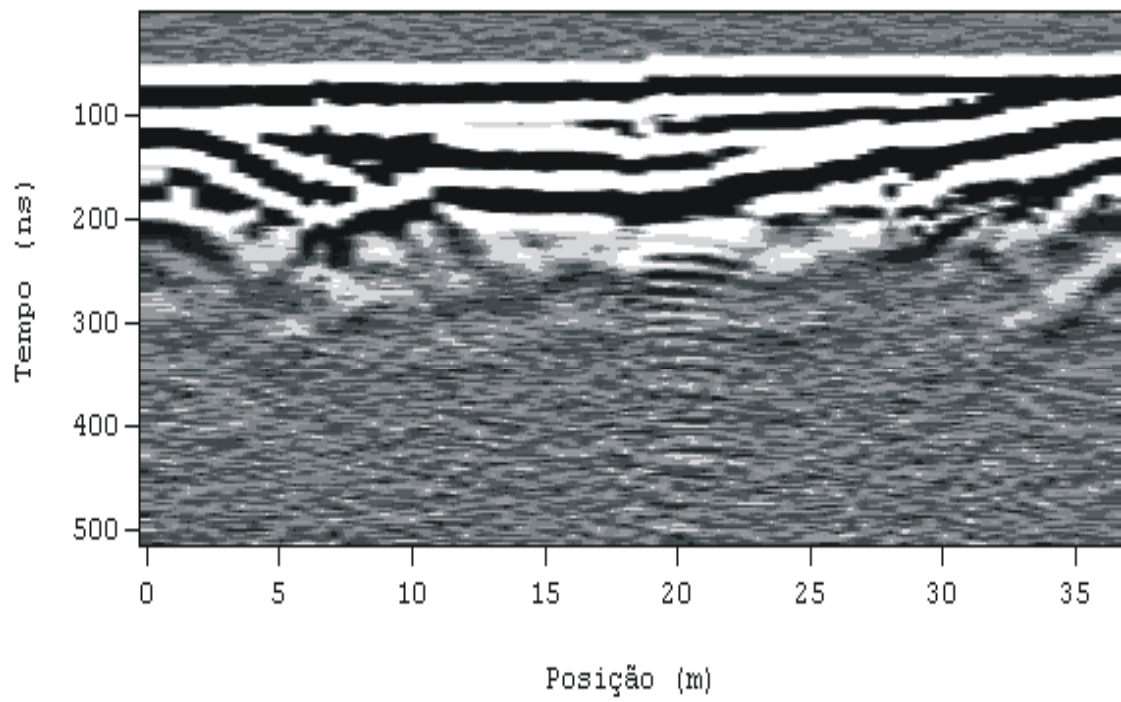
SEÇÃO 12



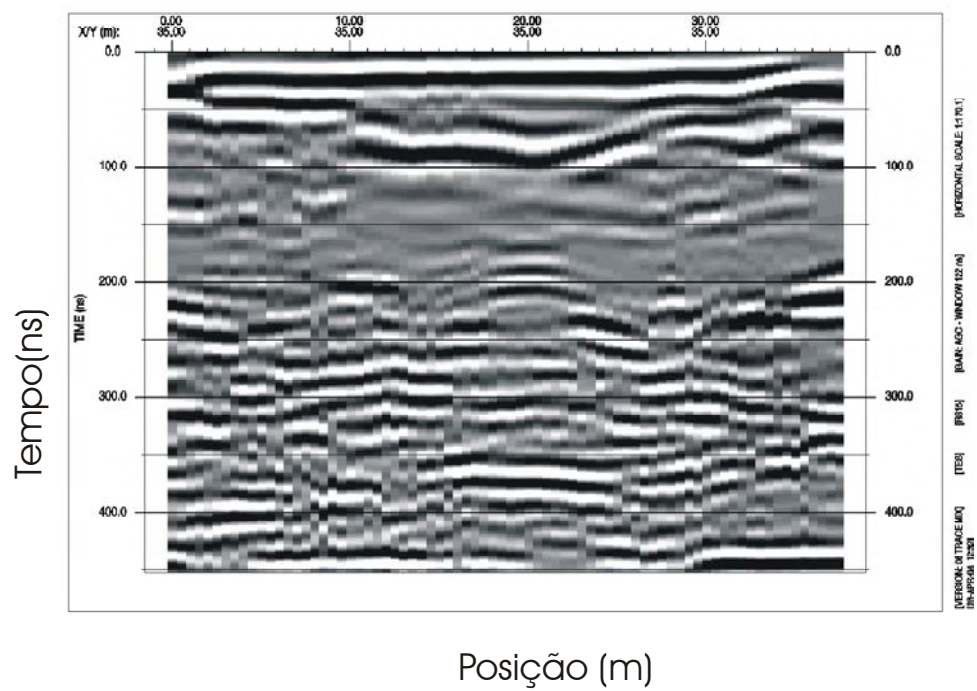
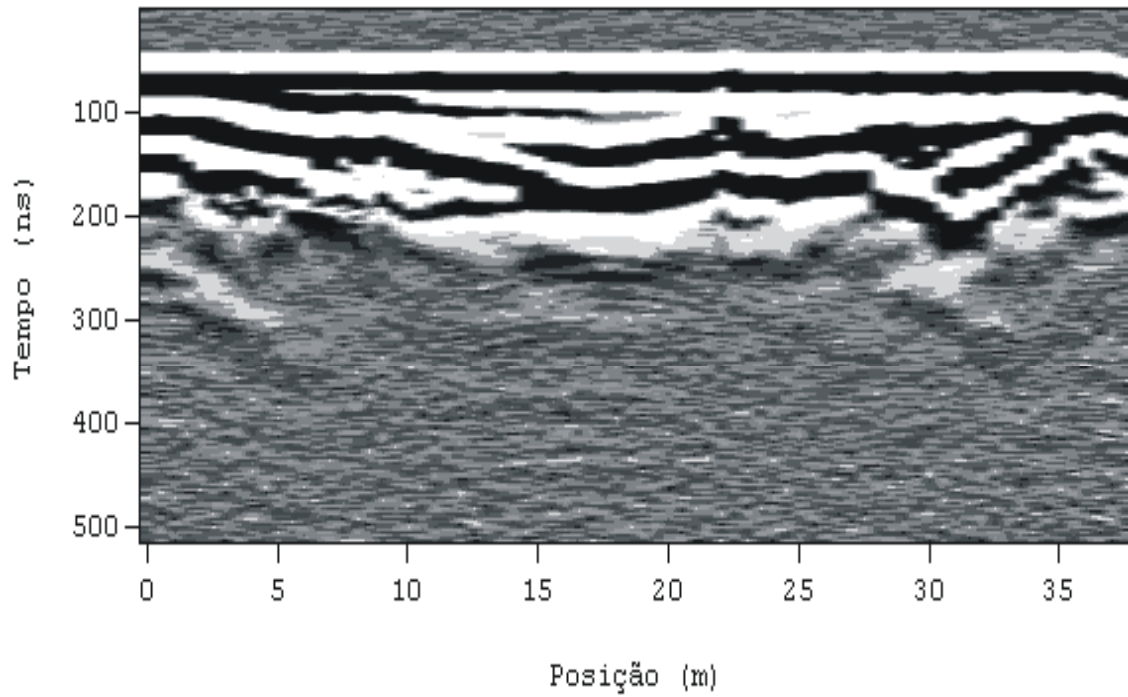
SEÇÃO 13



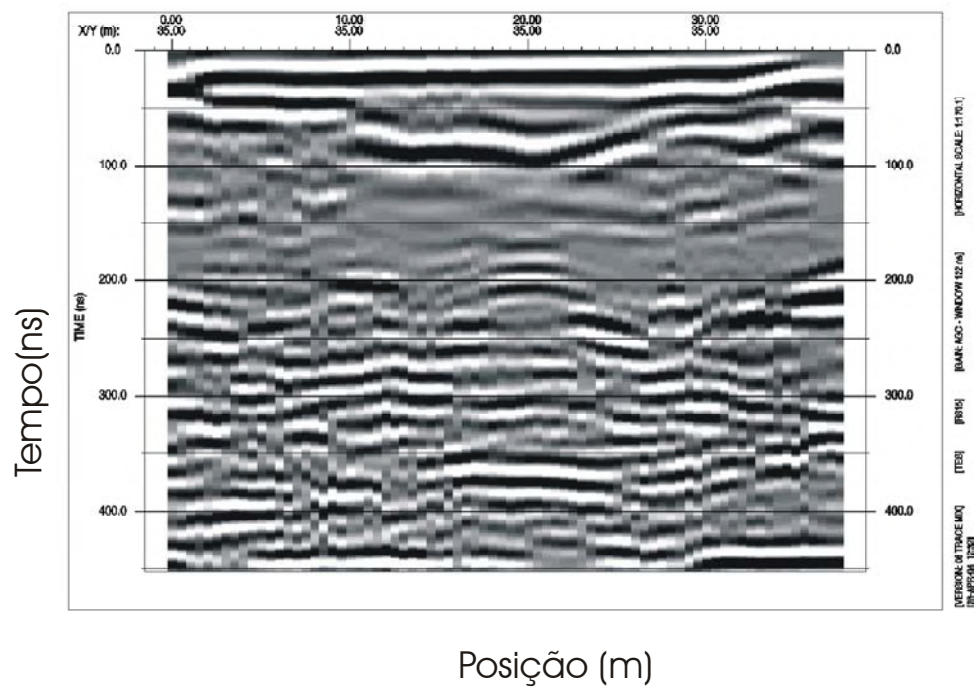
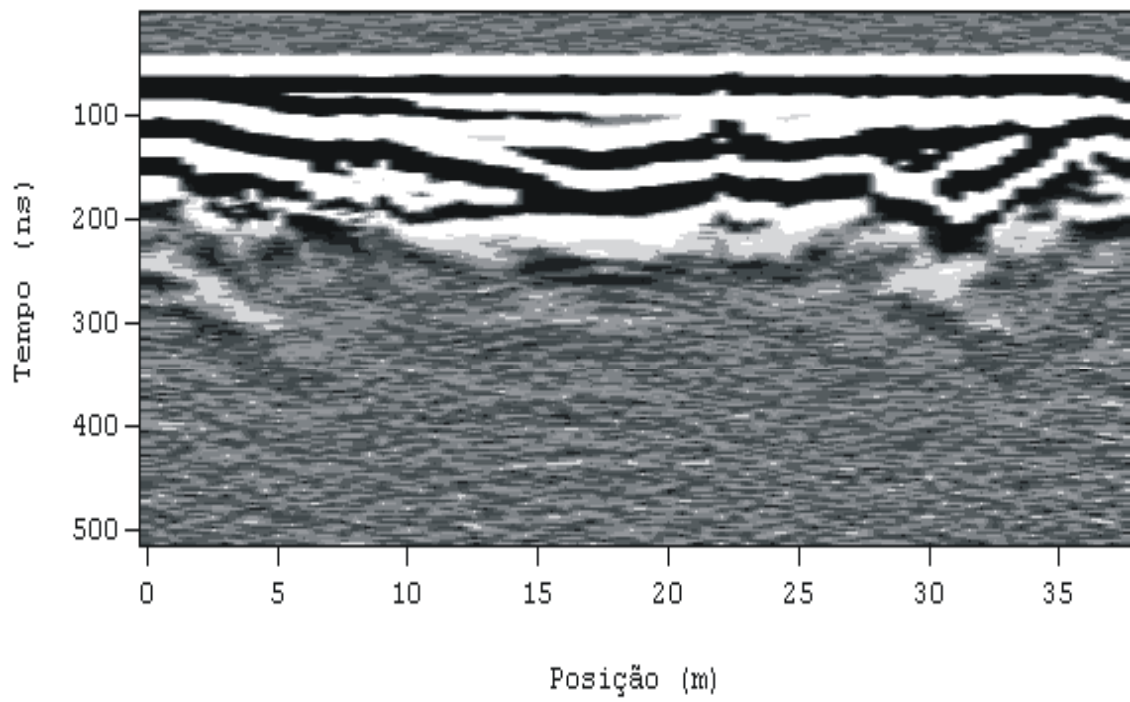
SEÇÃO 14



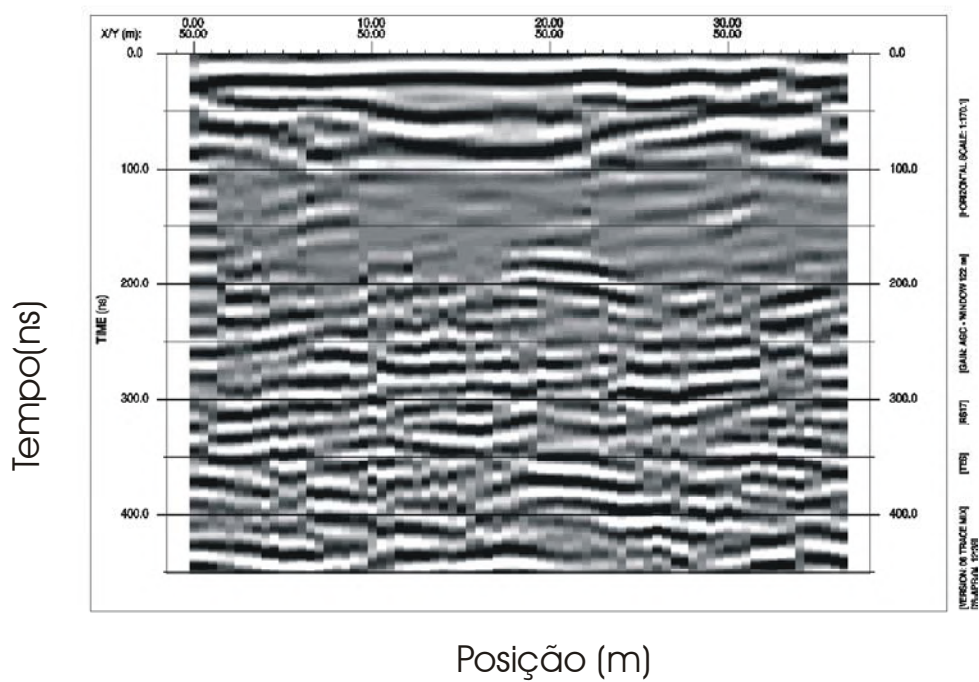
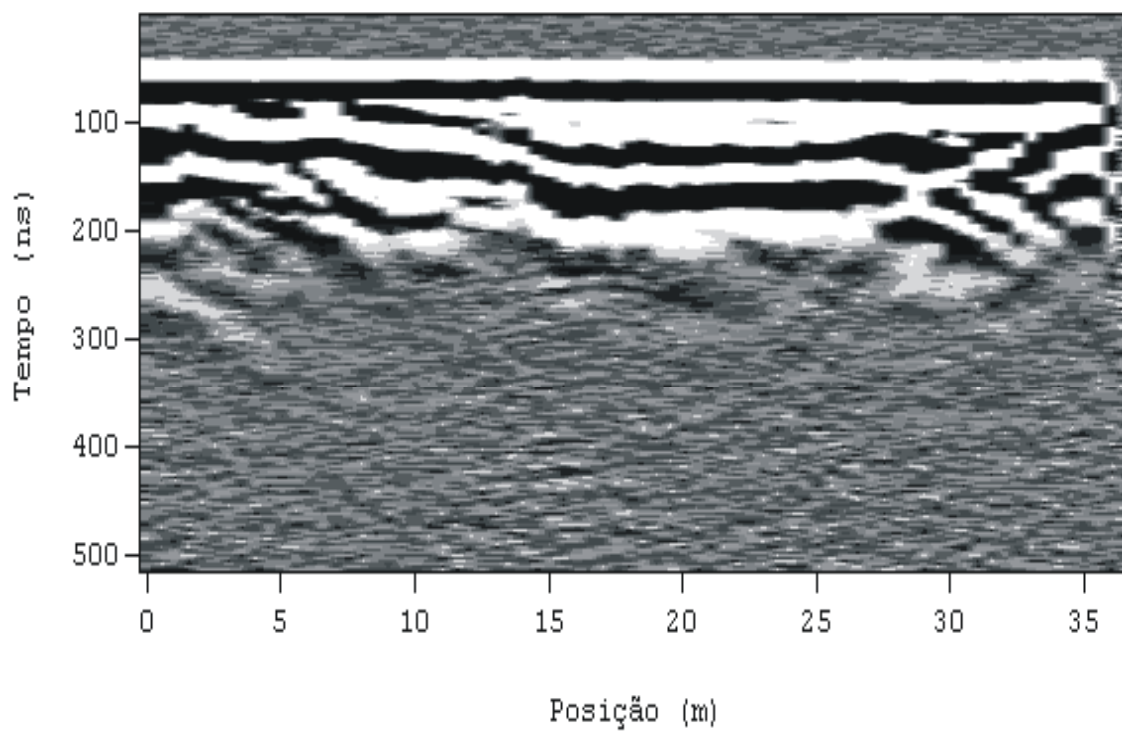
SEÇÃO 15



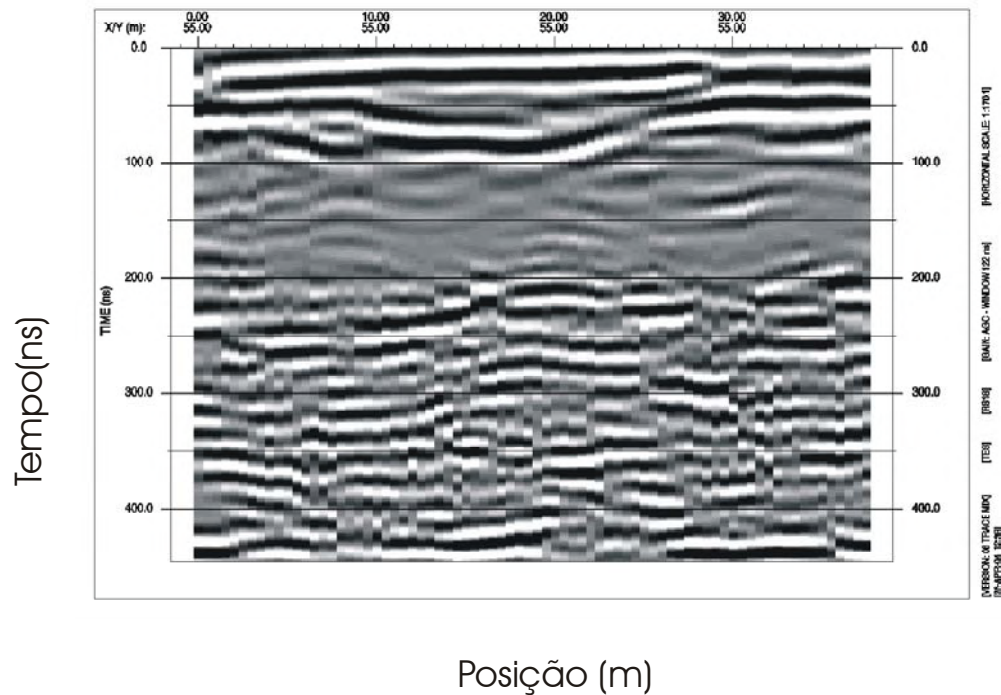
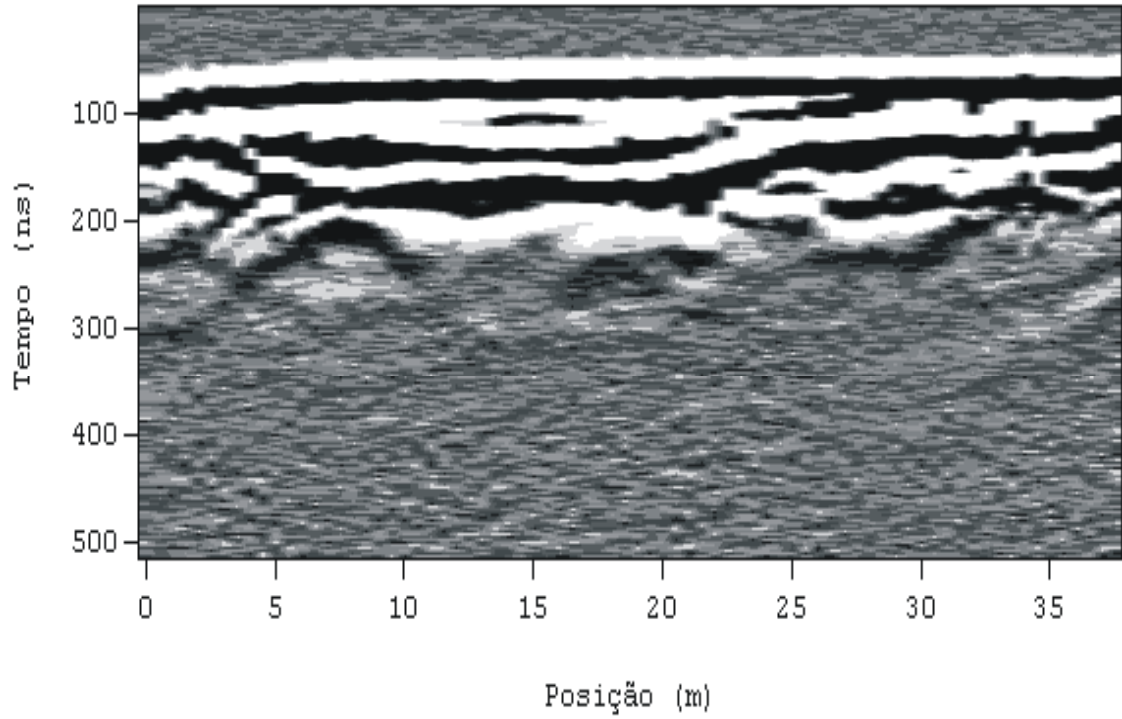
SEÇÃO 16



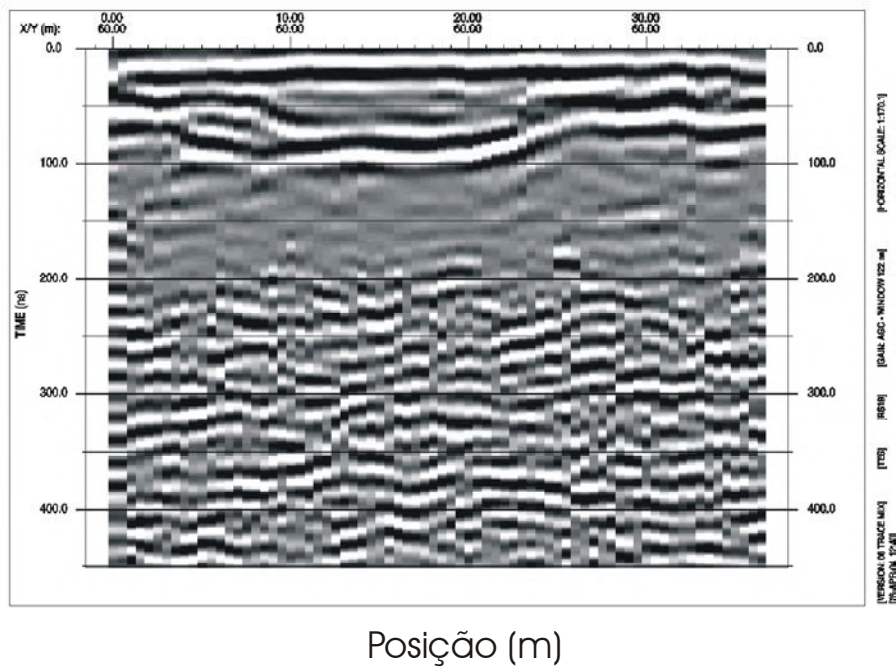
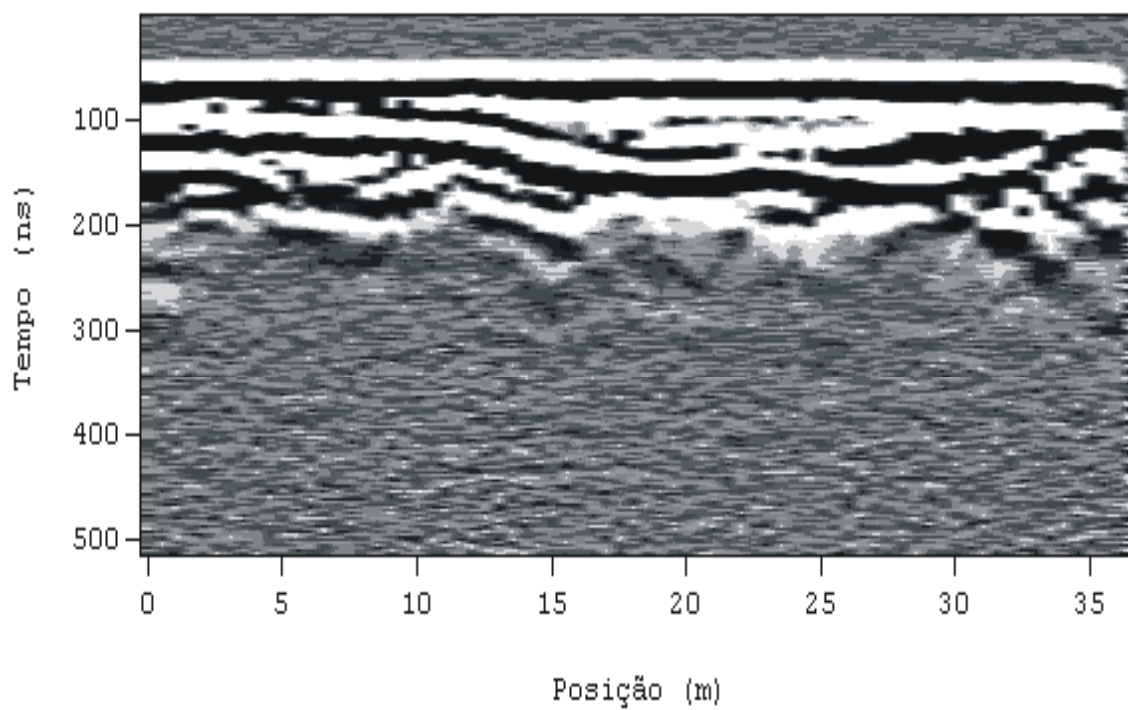
SEÇÃO 17



SEÇÃO 18



SEÇÃO 19



SEÇÃO 20

