



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA**

**Levantamento e Processamento de dados de Radar de  
Penetração no Solo (GPR)  
Em um afloramento da Bacia de Resende/RJ**

**Aluno: Zaque Alves de Araújo Júnior**

**Orientadora: Professora Paula Ferrúcio**

**Apoio:**



**Rio de Janeiro, setembro de 2003**

## **AGRADECIMENTOS**

**Agradeço a Deus pelo dom da vida, afinal de contas sem ela não estaria aqui! Também agradeço à Roberta Gabriela, pelo seu imenso apoio e carinho em todos os momentos. À minha família, pela orientação e educação exemplar que me deram, o que contribuiu para a formação do meu caráter.**

**Agradeço a professora Paula Ferrúcio pela orientação acadêmica, e incentivo na Geofísica; também a Gleide Alencar por participar inteiramente da aquisição dos dados e processamento das linhas de radar. Aos motoristas e amigos Roberto e Luciano, por nos proporcionar a condução necessária para o equipamento de campo e nos auxiliar no levantamento das linhas de radar. A web designer Viviane Pinheiro, por ter me dado todas as dicas quanto ao modelamento de imagens utilizado neste relatório.**

**Ao professor Carlos Jorge de Abreu por ter me concedido tão gentilmente o uso dos equipamentos do GEDAP (Grupo de Estudos de Sistemas Depositionais de águas Profundas), para a elaboração e imageamento deste relatório.**

**Não poderia esquecer dos companheiros que comigo estiveram em toda a graduação; e não podendo citar todos mencionarei algumas figuras que merecem destaque: Leonardo Penha (Gavião), Fagner (Pagodeiro), Robertinho (Gnomo), Mauro, Marcelo Resende, Érick, Romualdo, Fernando (Vando) e o companheiro de todas as viagens André que inclusive me ajudou neste relatório.**

## **Índice:**

<b>Capítulo I – Introdução</b>	<b>Pg 1</b>
<b>1.1 – Apresentação do Estudo</b>	<b>Pg 1</b>
<b>1.2 – Objetivo e Finalidade</b>	<b>Pg 1</b>
<b>1.3 – Características da Área Estudada</b>	<b>Pg 2</b>
1.3.1 – Localização	Pg 2
1.3.2 – Aspectos Geomorfológicos e Geológicos	Pg 3
1.3.2.1 – Geomorfologia	Pg 3
a) Drenagem	Pg 3
b) Clima e Vegetação	Pg 3
c) Topografia e Relevo	Pg 4
1.3.2.2 – Geologia	Pg 5
a) Aspectos Tectônicos e Estruturais	Pg 5
b) Embasamento	Pg 6
c) Sedimentação	Pg 6
<b>1.4 – Principais Métodos Geofísicos</b>	<b>Pg 9</b>
a) Métodos Elétricos	Pg 9
b) Método Gravimétrico	Pg 9
c) Método Magnético	Pg 10
d) Método Sísmico	Pg 10
e) Métodos Eletromagnéticos	Pg 10
<b>Capítulo II – Radar de Penetração no Solo (GPR)</b>	<b>Pg 12</b>
<b>2.1 – Princípios Básicos</b>	<b>Pg 12</b>
2.1.1 – Propagação de Ondas Eletromagnéticas	Pg 12
2.1.2 – Parâmetros que Influenciam na Aquisição de Dados com o GPR	Pg 15
a) O Uso do Equipamento	Pg 15
b) Água	Pg 16
c) Sedimentos Argilosos	Pg 16
d) Sedimentos Arenosos	Pg 17
<b>2.2 – Características do sistema GPR</b>	<b>Pg 17</b>
2.2.1 – Pulso Eletromagnético e a Resolução	Pg 17
2.2.2 – Alcance Atingido por um Sinal Eletromagnético	Pg 18

2.2.3 – O Equipamento	Pg 18
2.2.4 – Arranjos para a aquisição dos dados	Pg 19
2.2.5 – Radargrama	Pg 23
<b>2.3 – Processamento de dados de GPR</b>	<b>Pg 24</b>
2.3.1 - Análise de Velocidades	Pg 24
2.3.2 – Dewow	Pg 25
2.3.3 – Declip	Pg 25
2.3.4 – Filtros	Pg 25
2.3.5 – Ganho	Pg 26
<b>Capítulo III – Metodologia Utilizada</b>	<b>Pg 27</b>
<b>3.1 – Introdução</b>	<b>Pg 27</b>
<b>3.2 – Aquisição dos Dados</b>	<b>Pg 29</b>
<b>3.3 – Processamento dos Dados</b>	<b>Pg 30</b>
3.3.1 – Cálculo de Velocidades	Pg 30
3.3.2 – Etapas do Processamento	Pg 31
a) ETAPA 1	Pg 32
b) ETAPA 2	Pg 32
3.3.3 – Os Dados de Radar – Radargramas	Pg 33
<b>3.4 – Interpretações</b>	<b>Pg 44</b>
<b>Capítulo IV – Conclusões</b>	<b>Pg 45</b>
<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>Pg 46</b>

## **Índice de figuras:**

<b>Figura 1:</b> Foto panorâmica do afloramento Rádio Agulhas Negras na Bc. de Resende.	<b>Pg 1</b>
<b>Figura 2:</b> Mapa mostrando o principal acesso ao afloramento estudado - rodovia Presidente Dutra (BR – 116).	<b>Pg 2</b>
<b>Figura 3:</b> Compartimentação do relevo na região da bacia de Resende.	<b>Pg 4</b>
<b>Figura 4:</b> Esboço de um perfil geológico, sem escala, transversal à região que sofreu tectonismo cenozóico.	<b>Pg 5</b>
<b>Figura 5:</b> Correlação sedimentológica entre as bacias de São Paulo, Taubaté, Resende e Volta Redonda.	<b>Pg 6</b>
<b>Figura 6:</b> Estratigrafia relacionada com tectônica e sedimentação da bacia de Resende.	<b>Pg 7</b>
<b>Figura 7:</b> Mapa geológico da região em estudo.	<b>Pg 8</b>
<b>Figura 8:</b> Transmissão e recepção eletromagnética.	<b>Pg 11</b>
<b>Figura 9 :</b> O gráfico demonstra o efeito da variação da permitividade dielétrica na forma do cone de irradiação da energia eletromagnética emitida pelo radar.	<b>Pg 13</b>
<b>Figura 10:</b> Relação entre frequência, condutividade e atenuação.	<b>Pg 14</b>
<b>Figura 11:</b> Variação da velocidade de propagação com a frequência, para valores de condutividade.	<b>Pg 14</b>
<b>Tabela 1:</b> Relação entre os valores típicos dos parâmetros eletromagnéticos para alguns materiais geológicos.	<b>Pg 15</b>
<b>Figura 12:</b> Gráfico da relação da constante dielétrica (k) pelo conteúdo de água.	<b>Pg 16</b>
<b>Figura 13:</b> Representação de dois eventos correspondentes a pulsos eletromagnéticos.	<b>Pg 17</b>
<b>Figura 14:</b> Foto de um equipamento de GPR sendo utilizado em um levantamento.	<b>Pg 18</b>

<b>Figura 15:</b> Esquema de representação sintetizando os diversos componentes de sistema de GPR biestático e a propagação do pulso eletromagnético no subsolo.	<b>Pg 19</b>
<b>Tabela 2:</b> Relação entre frequência das antenas e o parâmetro espaçamento máximo entre as estações.	<b>Pg 20</b>
<b>Tabela 3:</b> Relação entre a frequência usada e o parâmetro de separação de antenas.	<b>Pg 20</b>
<b>Figura 16:</b> Modelo de caminhos percorridos pelas frentes de onda, em prospecções do tipo CMP e WARR.	<b>Pg 21</b>
<b>Figura 17:</b> Representação esquemática do método de trans-iluminação.	<b>Pg 21</b>
<b>Figura 18:</b> Figura mostrando a aplicação da técnica de radar de poço.	<b>Pg 22</b>
<b>Figura 19:</b> Variação da técnica utilizando-se o “crosshole”.	<b>Pg 22</b>
<b>Figura 20:</b> Representação esquemática do método de afastamento constante.	<b>Pg 22</b>
<b>Figura 21:</b> Seção de radargrama onde se observam formas hiperbólicas originadas pela aproximação e posterior afastamento de uma anomalia eletromagnética.	<b>Pg 23</b>
<b>Figura 22:</b> Radargrama correspondente ao levantamento com GPR realizado no afloramento estudado (figura 1) plotado na chamada “variação de densidade”.	<b>Pg 23</b>
<b>Figura 23:</b> Modelo estrutural do afloramento na Bc. de Resende segundo Ramos (2002).	<b>Pg 27</b>
<b>Figura 24:</b> Transformação em overlay do modelo geológico de Ramos (2002), colocado sobre a foto panorâmica do afloramento da Bc. de Resende.	<b>Pg 28</b>
<b>Figura 25:</b> Perfil estratigráfico feito no afloramento Rádio Agulhas Negras.	<b>Pg 28</b>
<b>Figura 26:</b> O pulso de radar mostrado no modo gráfico de um sistema PulseEkko IV, a região hachurada é correspondente a faixa onde se deve posicionar o tempo zero.	<b>Pg 29</b>

<b>Figura 27:</b> Radargrama do levantamento tipo WARR realizado no afloramento Rádio Agulhas Negras.	<b>Pg 30</b>
<b>Figura 28:</b> Sem o processamento verifica-se que a curva de frequências obtidas em um traço qualquer (Ex: Traço 161), é bem diferente da curva média de frequências (em azul).	<b>Pg 31</b>
<b>Figura 29:</b> Feito o processamento final pode-se observar que a curva de frequências obtidas em um traço qualquer (Ex: Traço 161) está mais próximo à curva das frequências médias (em azul).	<b>Pg 31</b>
<b>Figura 30:</b> Diagrama da primeira etapa do processamento.	<b>Pg 32</b>
<b>Figura 31:</b> Diagrama da segunda etapa de processamento.	<b>Pg 33</b>
<b>Figura 32:</b> Linha 1	<b>Pg 34</b>
<b>Figura 33:</b> Linha 2	<b>Pg 35</b>
<b>Figura 34:</b> Linha 3	<b>Pg 36</b>
<b>Figura 35:</b> Linha 4	<b>Pg 37</b>
<b>Figura 36:</b> Linha 5	<b>Pg 38</b>
<b>Figura 37:</b> Linha 6	<b>Pg 39</b>
<b>Figura 38:</b> Linha 7	<b>Pg 40</b>
<b>Figura 39:</b> Linha 8	<b>Pg 41</b>
<b>Figura 40:</b> Linha 9	<b>Pg 42</b>
<b>Figura 41:</b> Linha 10	<b>Pg 43</b>
<b>Figura 42:</b> { linha 1 }	<b>Pg 44</b>
<b>Figura 43:</b> { linha 9 }	<b>Pg 44</b>
<b>Anexo 1:</b> As 6 (seis) maiores empresas que atuam no ramo de GPR.	
<b>Anexo 2:</b> Falhas plotadas em um estereograma.	

## Capítulo I – Introdução

### 1.1 – Apresentação do Estudo

A palavra “radar” é na verdade uma sigla e significa “*rádio detection and ranging*”, isto é, um sistema de detecção de objetos usando pulsos eletromagnéticos de curta duração que se propagam através do ar e que, foi desenvolvido pelos ingleses durante a Segunda Guerra Mundial. Para a investigação do subsolo são usados radares do tipo *pulse radar*, nesses, em intervalos de tempo muito pequenos, a onda de rádio é enviada ao subsolo por uma antena transmissora e captada na superfície por uma antena receptora.

Existem diversas empresas comerciais e centros de pesquisa em todo o mundo que utilizam o GPR (*radar de penetração no solo ou Ground Penetrating Radar*) em diferentes tipos de investigação. Atualmente temos vários tipos de equipamentos de “*pulse radar*” e estas versões do GPR estão amplamente disponíveis para aquisição.

No Brasil a utilização do GPR tem pouco mais de uma década. Isto é muito pouco tempo para que se possa atingir um alto índice de confiança na consolidação desta técnica como uma ferramenta eficaz.

Cezar (2001) faz uma discussão sobre as várias aplicações do GPR destacando a sua utilização na geologia de engenharia, lençol freático e plumas de contaminação, também comenta sua utilização na procura de objetos no subsolo como mapeamento de oleodutos e pesquisas arqueológicas. Diversos autores (Cezar, 2001; Madeira, 2002; etc) chamam atenção para o fato de que no Brasil, quem primeiro publicou trabalhos utilizando o GPR foi Sauck em 1995. Ele realizou levantamentos em solos e sedimentos na região amazônica onde, pela primeira vez, foi discutida a influência das argilas tropicais na atenuação das ondas eletromagnéticas de radar. Posteriormente trabalhos como o de Botelho & Araújo (1996) utilizando o GPR na pesquisa de jazidas minerais, entre outros, foram publicados.

Sabe-se que este método apresenta algumas restrições que limitam a profundidade de penetração do sinal. Mesmo em condições ideais para o equipamento, como sedimentos quartzosos, bem classificados e secos, o máximo alcançado, utilizando-se uma frequência de 25 MHz, foi 60 m de profundidade, Madeira (2002).

No **Anexo 1** temos, a nível de informação um pequeno levantamento bibliográfico sobre algumas empresas que trabalham com GPR (fabricação de equipamentos e “softwares”) no Brasil.

### 1.2 – Objetivo e Finalidade

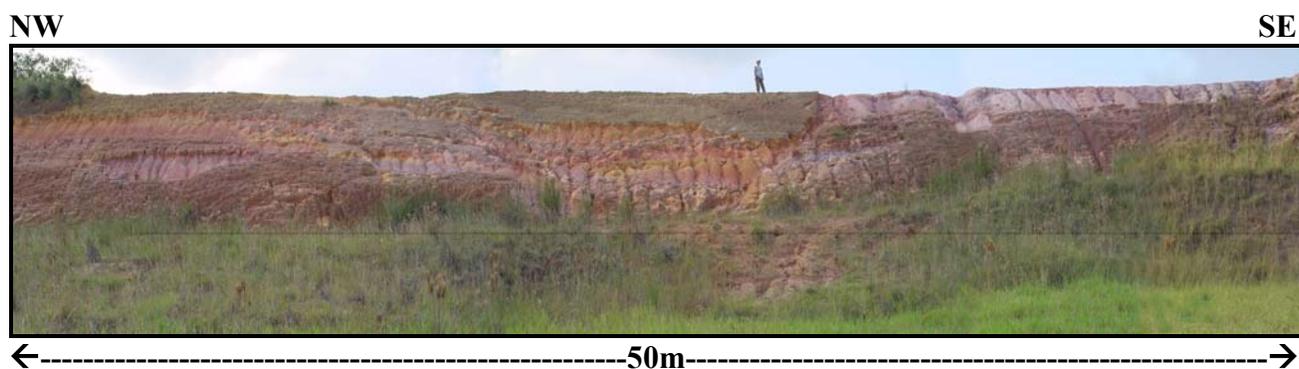
Neste trabalho foi utilizado o radar de penetração no solo (GPR) com o objetivo de analisar a relação entre os padrões de reflexão por ondas de radar e as estruturas presentes em determinada seção geológica (afloramento). Foi utilizado no estudo a seção geológica descrita por Ramos (2002) com a finalidade de identificar o padrão de falhamento presente no afloramento.

## 1.3 – Características da Área Estudada

### 1.3.1 – Localização

O afloramento estudado (**Rádio Agulhas Negras**) localiza-se em corte de terreno paralelo à rodovia Presidente Dutra (Rio-São Paulo) no município de Resende (Rio de Janeiro). Na figura 1 pode ser visualizado o afloramento estudado com dimensões de cerca de 50 metros de comprimento por 8 metros de altura. Na foto o homem no topo do afloramento serve de escala. A localização do afloramento na rodovia Presidente Dutra é marcada por uma seta na figura 2 (quadro direito inferior).

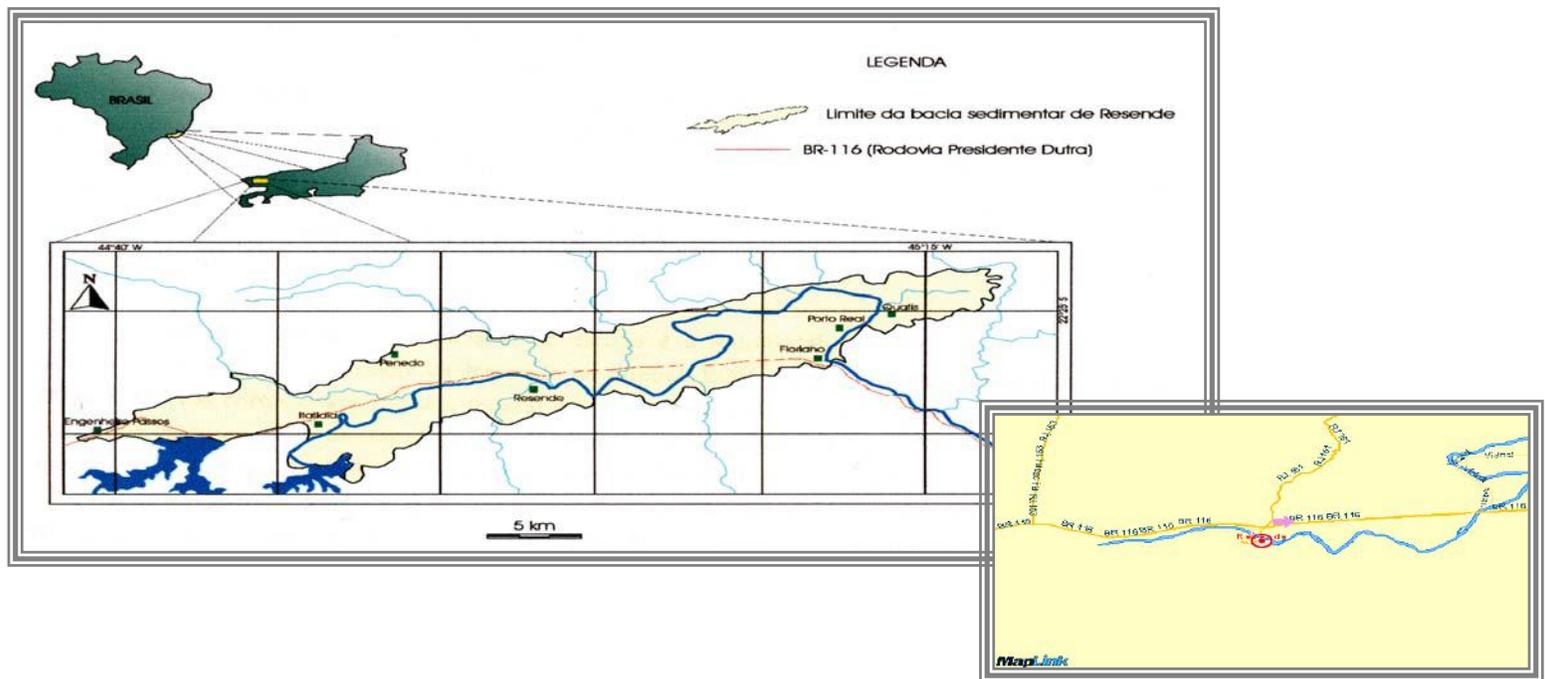
De São Paulo e do Rio de Janeiro o acesso é feito pela Rodovia Presidente Dutra e o tempo médio de viagem de carro é de duas e três horas, respectivamente. Fonte: <http://www.resende.rj.gov.br/>.



**Figura 1:** Foto panorâmica do afloramento Rádio Agulhas Negras na Bc. de Resende.

O afloramento estudado está inserido dentro da Bc. de Resende que constitui um segmento do *Rift Continental do Sudeste do Brasil*. A bacia está localizada no extremo sudoeste do Estado do Rio de Janeiro (figura 2) abrangendo os municípios de Barra Mansa (distrito de Floriano), Quatis, Porto Real, Resende e Itatiaia, Engenheiro Passos (município de Resende), e o município 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. A bacia possui 47 Km de comprimento, sendo alongada no sentido ENE – WSW; sua largura máxima é de 7,3 Km a oeste da cidade de Resende e largura mínima de 1,2 Km a oeste da cidade de Itatiaia. (Riccomini, 1989 in Ramos, 2002).



**Figura 2:** Mapa mostrando o principal acesso ao afloramento estudado - rodovia Presidente Dutra (BR – 116).

### 1.3.2 – Aspectos Geomorfológicos e Geológicos

Neste trabalho não temos como objetivos apresentar uma vasta revisão bibliográfica sobre a Geomorfologia e ou Geologia da área; apresentamos apenas alguns tópicos que merecem destaque. São eles:

#### 1.3.2.1 – Geomorfologia

##### a) Drenagem

Constituindo o principal eixo de drenagem da região, o rio Paraíba do Sul tem suas nascentes na serra da Bocaina (rios Paraibuna e Paraitinga) localizados no sul da bacia de Resende. Desta posição ele segue para SW, e na altura de Guararema (SP) ele muda bruscamente seu curso, onde existe um alto que separa as bacias de Taubaté e São Paulo. Logo em seguida o Paraíba toma o curso E-NE, atravessando as bacias de Taubaté, Resende e Volta Redonda, indo para o mar em Atafona, no norte do estado do Rio de Janeiro, (Yamamoto, 1995).

##### b) Clima e Vegetação

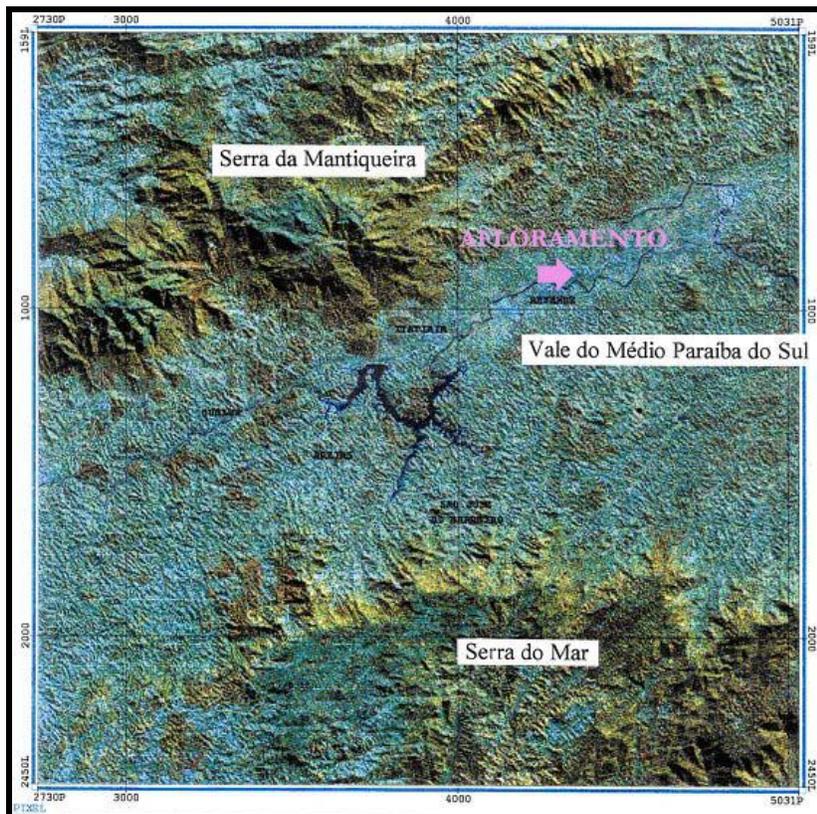
O tipo climático atual da região, segundo a classificação climática de Köppen, é mesotérmico, com verões quentes e estação chuvosa no verão. O clima é continental do tipo “Aw”, isto é, com uma estação seca bem acentuada coincidindo com o inverno (Nimer et al., 1971).

De acordo com Alonso (1977), a vegetação primitiva da região pode ser dividida em dois tipos predominantes: Floresta Subcaducifolia tropical e Campo. O segundo tipo de vegetação ocorre na região serrana, em altitudes acima de 1.900 m, sendo caracterizada por uma cobertura herbácea intercalada por arbustos de pequeno porte de aspecto retorcido. A vegetação do tipo Floresta Subcaducifolia Tropical ocorre nas escarpas das serras e se estende ao longo do vale do rio Paraíba do Sul. Atualmente, resquícios das florestas primitivas ocorrem somente nas escarpas das serras do Mar e da Mantiqueira, tendo praticamente desaparecido do vale do Paraíba devido à violenta ação antrópica reinante desde o ciclo do café (Ramos, 2002).

O clima da área onde foram levantadas as linhas de GPR, é o característico de toda a região como foi descrito acima; já a vegetação não existe mais nessa área, pois houve um desmatamento acompanhado de um nivelamento do terreno feito pela administração do Sistema de Comunicação Porto Real.

### c) Topografia e Relevo

Segundo Ramos (2002), os diversos tipos e formas de relevo da região em estudo relacionam-se principalmente: à sua evolução tectono-estrutural, às litologias e aos fatores climáticos e paleoclimáticos. Os eventos geológicos responsáveis por complexos arranjos estruturais e as diversas ocorrências litológicas geraram formas de relevo que constituem, na taxonomia adotada pelo Projeto Radambrasil, os Domínios Morfoestruturais, representados pelos compartimentos Serra do Mar, Serra da Mantiqueira e Vale do Paraíba do Sul (figura 3).



**Figura 3:** Compartimentação do relevo na região da bacia de Resende. Fonte: (Imagem Landsat TM, escala 1:500.000 in Ramos, 2002).

### 1.3.2.2 – Geologia

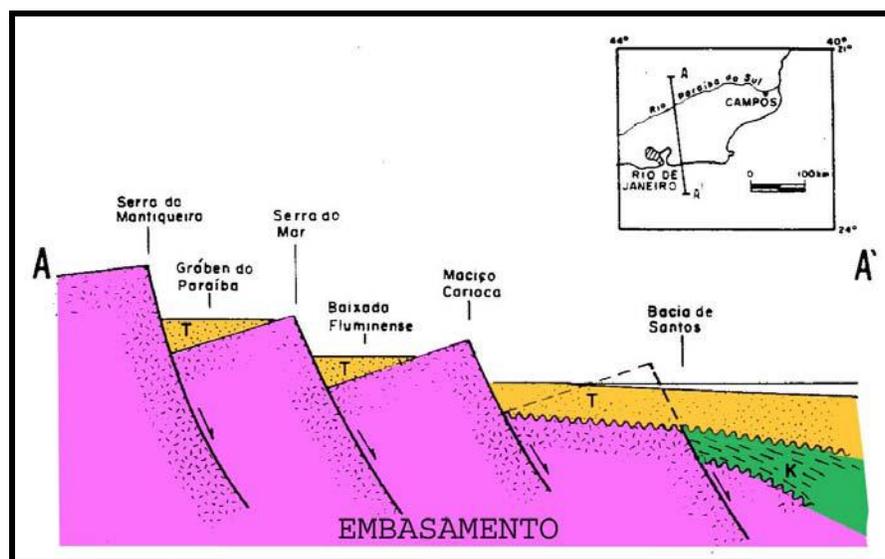
#### a) Aspectos Tectônicos e Estruturais

A bacia de Resende está inserida no sistema de rifteamento da Serra do Mar, (Almeida, 1976) juntamente com outras bacias sedimentares como São Paulo e Taubaté. Posteriormente, em 1989, Riccomini aglutinou-as com as bacias de Curitiba, Volta Redonda e as de menores dimensões (Itaboraí e Bonfim) sob a denominação de rift continental do Sudeste do Brasil pois, tais bacias tafrogênicas estão dispostas sobre uma faixa de orientação E-NE, o que é subparalelo aos principais traços estruturais da região sudeste do Brasil.

Desde a Serra da Mantiqueira, com mergulhos estruturais predominantemente para SE, até a Serra do Mar, com mergulhos para NW, a região em questão encontra-se no médio vale do rio Paraíba do Sul e caracteriza-se por uma estruturação sinformal, que foi primeiramente descrita por Lamego em 1939 (in Mello, 1992).

O embasamento apresenta feições estruturais principalmente de falhas transcorrentes (ou zonas de cisalhamento) de idade brasiliana, com direção NE-SW (Hasui et al., 1982, in Mello, 1992); cortando toda a bacia em sua extensão. Outras direções de falhas foram descritas por Albuquerque (2001): ENE-WSW e NW-SE.

Atualmente, mesmo depois da ação dos agentes erosivos, ainda se destacam os efeitos do tectonismo cenozóico. Na figura 4 são ressaltados o caráter escalonado dos falhamentos e o basculamento dos blocos resultantes o que deu origem a áreas elevadas, já modeladas hoje pela erosão, são elas: Serra do Mar, Serra da Mantiqueira e o Maciço Carioca; e, entre essas depressões, em figura de semigrabens, o Gráben do Paraíba e a Baixada Fluminense.



**Figura 4:** Esboço de um perfil geológico, sem escala, transversal à região que sofreu tectonismo cenozóico. Fonte: (Mello, 1992).

## b) Embasamento

Segundo Riccomini (1987), o embasamento cristalino pré-Cambriano das bacias é constituído de rochas metamórficas (milonito-gnaisses, blastomilonitos, milonitos, gnaisses bandados, gnaisses graníticos, xistos, quartzitos e anfibolitos bandados), rochas ígneas (granitos, pegmatitos e aplitos) e migmatitos com estruturas variadas. Apresentando-se sob a forma de diques e sills, intrusões de diabásio são muito comuns inclusive no substrato da bacia de Resende. Datam, segundo Amaral et al., (1966), do Jurássico superior ao Cretáceo Inferior. Apresentando-se como grandes maciços (Itatiaia, Morro Redondo e Passa Quatro), e também como diques e sills, temos as rochas alcalinas com idades entre o final do Cretáceo e o início do Terciário. Estas inclusive foram vistas no afloramento descrito nesse trabalho, onde o embasamento apresentava-se alterado, porém eram visíveis muitos veios de quartzo e xistosidades com direção ENE; o que também foi descrito por Ramos (2002) em seção geológica vista na figura 23.

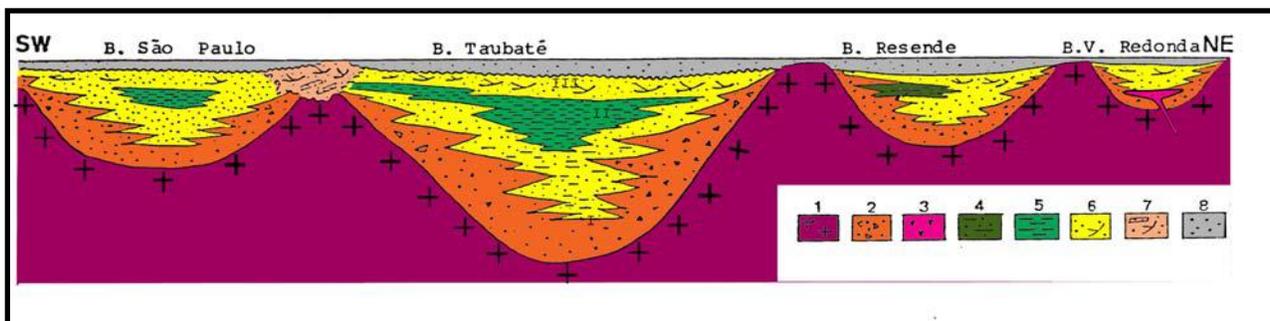
Raríssimas ocorrências de derrames de ankaramito e diques de lamprófiro estão presentes nas bacias de Volta Redondas e Itaboraí; estas são consideradas as rochas mais jovens da área, com datação do Eoceno Superior (Riccomini, 1987).

## c) Sedimentação

O sistema de bacias continentais, segundo Almeida (1967), tem sua origem ligada a um amplo processo tectônico relacionado à reativação Wealdeniana, que se iniciou no Neojurássico.

A configuração de semi-grabens sobre blocos tectônicos basculados para NW, é característico da bacia de Resende e também das bacias tafrogênicas mencionadas anteriormente (figura 5). Tal feição pode ser identificada, em micro escala, inclusive no afloramento Rádio Agulhas Negras (figura 1) e na figura 4.

Localizada no curso médio do rio Paraíba do Sul, entre Engenheiro Passos e Quatis, no extremo oeste do Estado do Rio de Janeiro, a bacia de Resende, possui aproximadamente 240 Km<sup>2</sup> de afloramento dos sedimentos terciários e quaternários nela contidos apresentando uma espessura máxima de sedimentos em torno de 200 m.



**Figura 5:** Correlação sedimentológica entre as bacias de São Paulo, Taubaté, Resende e Volta Redonda. (1) Embasamento; (2) Sistemas de leques aluviais e lamitos; (3) ankaramito; (4) lamitos e (5) folhelhos, ambos relacionados a instalação lacustre; (6) sistema fluvial colmatando a sedimentação lacustre; (7) sedimentos fluviais da região de Itaquaquecetuba retrabalhando folhelhos da fase de instalação lacustre e (8) sistema fluvial recente.

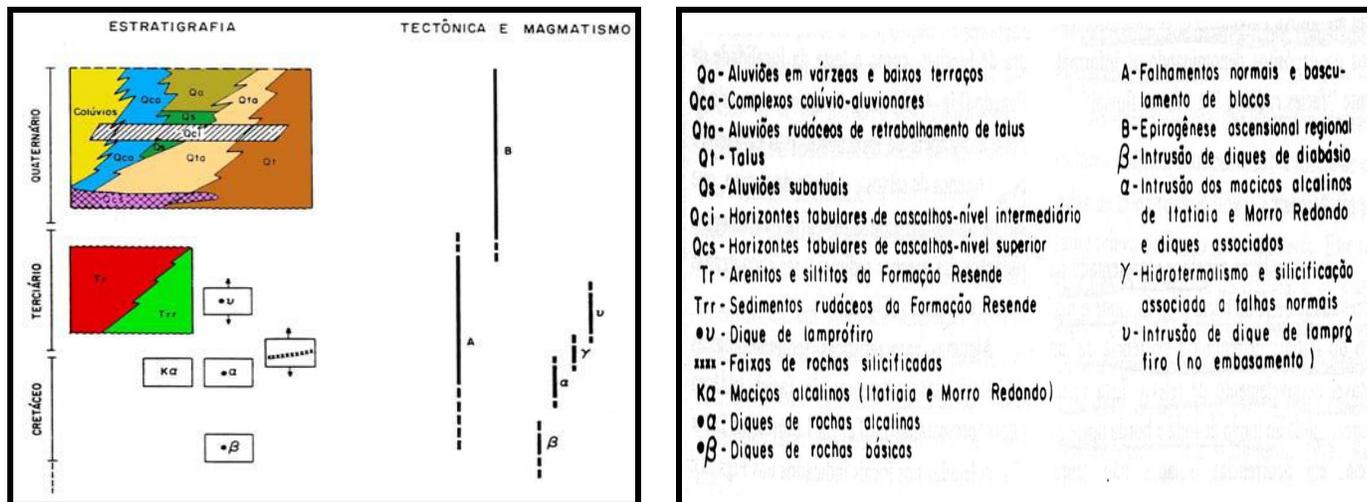
Fonte: Appi et al. (1996).

Amador (1975) e Amador et al., (1978), propuseram para a bacia de Resende, baseados em conceitos geomorfológicos, quatro unidades sedimentares: Formação Resende, (Plioceno-Mioceno), Formação Floriano e Formação Bulhões (Pleistoceno), e depósitos holocênicos. Porém muitos autores, não concordaram com Amador (op. cit), pois este não levou em consideração o papel da tectônica que é um fator determinante na configuração da bacia de deposição. Melo et al. (1985), afirma que parte dos depósitos atribuídos à Formação Floriano por Amador (1975) corresponde, na realidade, ao produto de alteração intempérica dos depósitos mais superficiais da Formação Resende (figura 6). Estes apresentam diferenciações quanto à coloração, minerais de argila, presença de minerais pesados instáveis e feldspatos. Fato constatado em campo no afloramento estudado.

Os sedimentos que preenchem a bacia, segundo Melo et al. (1985), são terciários e, são divididos em duas fácies:

-Um sistema de leques aluviais, marcante no sudoeste da bacia e ao longo da borda norte; constituído por depósitos de camadas de conglomerados ou de brechas polimíticas (fragmentos do embasamento e dos maciços alcalinos); estes vêm intercalados com camadas predominantemente de matriz lamítica ou de material arenoso envolvendo poucos fragmentos de rocha de pequeno tamanho.

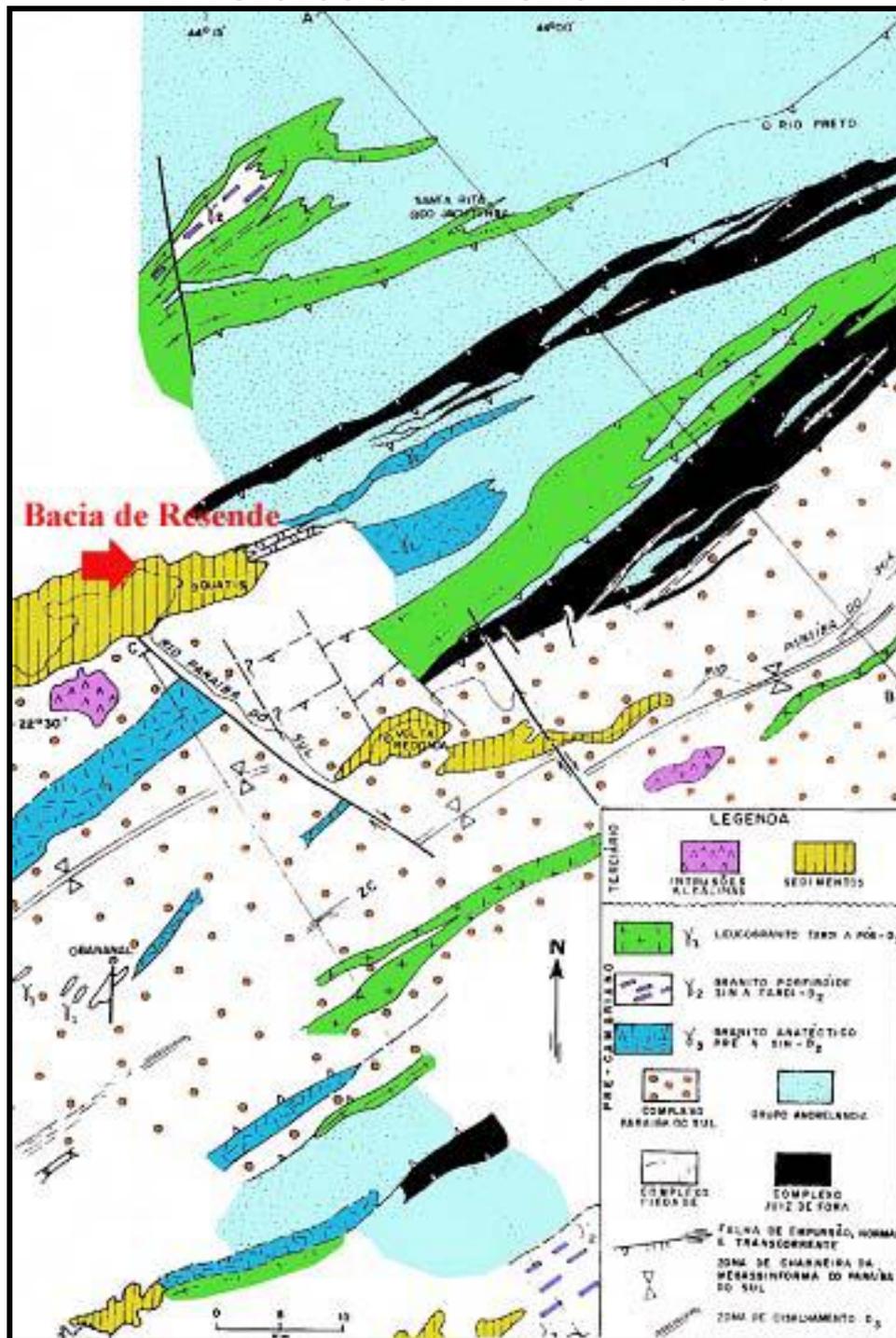
-Depósitos de sistema fluvial “entrelaçado”, contendo porções distais de corridas de lamias da fácies rudácea. Apresentam-se como sucessões de bancos com estratificação gradacional, variando de conglomerados na base a argilo-arenosos no topo (Yamamoto, 1995).



**Figura 6:** Estratigrafia relacionada com tectônica e sedimentação da bacia de Resende. Fonte: (Melo et al., 1983).

As grandes feições geológicas são sintetizadas no Mapa Geológico a seguir (figura 7):

**MAPA GEOLÓGICO DA REGIÃO EM ESTUDO:**



**Figura 7:** Mapa geológico da região em estudo. Fonte: (Madeira, 2002).

### **1.3 – Principais Métodos Geofísicos**

Visando uma introdução a Geofísica Aplicada apresenta-se a seguir um breve resumo das principais técnicas de prospecção geofísica. Estas se caracterizam por serem técnicas de investigação indireta, não destrutiva e com crescente aplicabilidade para diversas situações. São elas:

#### **a) Métodos Elétricos**

Dentre os métodos elétricos vale pena ressaltar a eletrorresistividade. Baseada na lei de Ohm, esta técnica consiste no uso de corrente contínua no terreno através de dois eletrodos metálicos (de corrente), ambos ligados a uma fonte elétrica. Outros dois eletrodos (de potencial) são também inseridos no terreno com a finalidade de registrar os valores de diferença de potencial no subsolo (Telford et al, 1990).

Os eletrodos são deslocados na superfície do terreno e com o aumento da distância entre os eletrodos de corrente, maiores profundidades são alcançadas. Os resultados do levantamento fornecem informações da resistividade dos materiais da subsuperfície, podendo-se, a partir deles, confeccionar mapas ou seções verticais. Nos mapas são apresentadas as distribuições espaciais das diferenças de condutividade e nos perfis, a variação vertical e lateral dessa propriedade. Ambos possibilitam identificar materiais que apresentam anomalias de condutividade/resistividade (Telford et al, 1990).

Os eletrodos podem ser colocados na superfície de diversas maneiras sendo as configurações mais conhecidas: Wenner, Schlumberger e dipolo-dipolo.

#### **b) Método Gravimétrico**

Variações existentes no campo gravitacional da Terra são à base dos levantamentos gravimétricos. Estas heterogeneidades laterais são ocasionadas pelas variações na densidade dos materiais constituintes do subsolo. Os dados coletados nesse tipo de levantamento também são corrigidos a partir de valores de referência, uma vez que as leituras são influenciadas por fatores externos tais como: maré luni-solar, “drift” da mola do equipamento, correção de ar livre (que leva em conta a elevação em relação a um nível de referência) e a correção do terreno, que desconta a influência da topografia no entorno do ponto de leitura (Telford et al, 1990).

Os levantamentos gravimétricos que objetivam alvos relativamente pequenos, requerem uma malha bastante densa e uma aquisição de dados precisa. Os levantamentos gravimétricos são realizados com gravímetros e os dados obtidos possibilitam a confecção de mapas (Ar Livre e Bouguer), nos quais são visualizadas diferenças horizontais na aceleração da gravidade, ou seja, as variações laterais de densidade dos materiais constituintes do subsolo. A interpretação da anomalia é feita a partir da elaboração de modelos de corpos com massa, que pudessem gerar a anomalia observada. (Telford et al., 1990).

### **c) Método Magnético**

Originadas pela magnetização de rochas ou objetos, as anomalias existentes no campo geomagnético da Terra são o fundamento dos estudos e levantamentos magnéticos. Dois tipos de magnetização dos materiais são identificados: a indução produzida pelo campo magnético da Terra e as magnetizações remanescentes, ocasionadas, por exemplo, por processos de aquecimento/resfriamento, que levam as “partículas magnéticas” do material a se orientarem de acordo com a direção do campo magnético da Terra naquele momento.

É sempre necessário determinar o campo total, para que se identifiquem anomalias do campo magnético da Terra em locais onde serão realizadas as prospecções magnetométricas. Deve-se levar em consideração as variações do campo, como por exemplo: tempestades magnéticas, variações diurnas e seculares. Portanto, nos levantamentos magnéticos normalmente empregam-se dois magnetômetros, um dos quais é utilizado para registrar as variações do campo geomagnético total e deve estar localizado distante de materiais que podem ocasionar distúrbios no campo. O outro magnetômetro é usado para a aquisição de dados. Normalmente subtraem-se das medidas obtidas no segundo magnetômetro os valores que correspondem ao campo magnético total da área que foi registrado no primeiro. Com o resultado final é confeccionado um mapa com as diferentes intensidades do campo geomagnético a partir de algoritmos de interpolação de pontos (Telford et al, 1990).

### **d) Método Sísmico**

Os levantamentos sísmicos têm sua base na Lei de Snell. É medido o tempo de propagação das ondas acústicas no subsolo a partir das reflexões e refrações. Tais ondas sofrem reflexão e refração ao incidirem em interfaces que correspondem a um contraste de propriedades elásticas dos meios. Os sinais refletidos e refratados são detectados a partir de um arranjo de receptores (geofones) - em superfície - ou hidrofones (no mar). Esses dados (tempo X distância), são processados posteriormente, de modo a gerar uma imagem que corresponda ao substrato, possibilitando a visualização de estruturas em subsuperfície.

No caso específico do petróleo o levantamento sísmico é uma etapa importante da exploração. É a sísmica que indica o caminho para a perfuração e fornece dados para análises dos possíveis reservatórios onde se concentram o petróleo e o gás natural.

### **e) Métodos Eletromagnéticos**

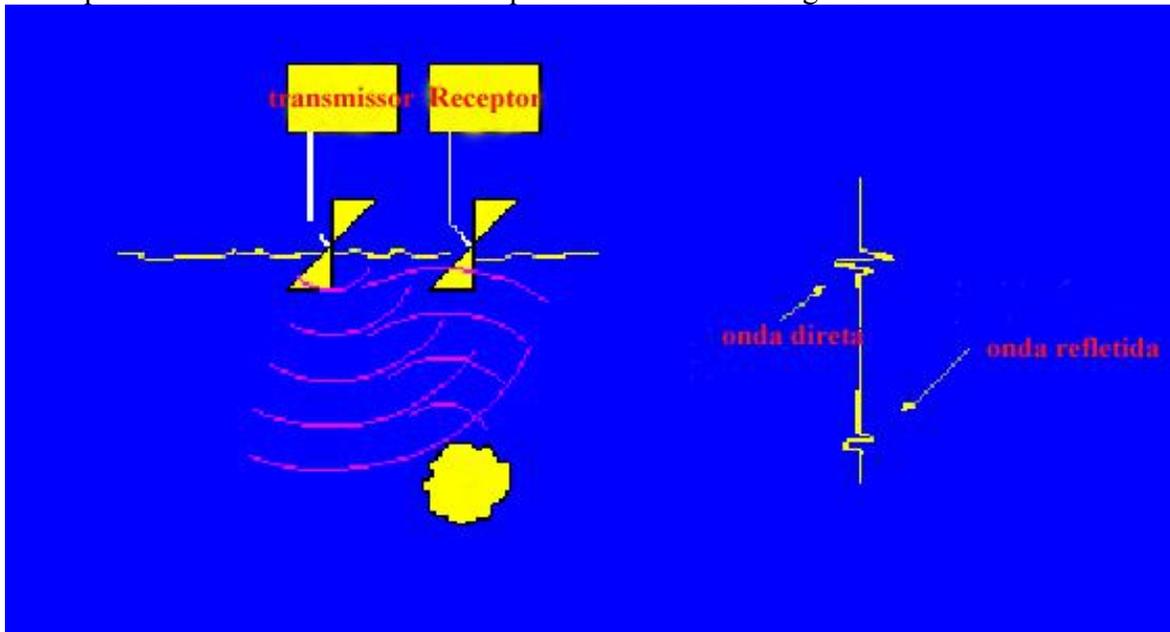
Usando como princípio às leis de indução eletromagnética esses métodos consistem na aplicação de um campo eletromagnético na superfície do terreno, utilizando-se de uma bobina transmissora, gerando um fluxo de corrente elétrica nos materiais condutores do subsolo. Tal fluxo dará origem a um campo secundário, que interagirá com o original, acarretando na alteração de suas características principais, ou seja, sua intensidade, fase e direção, (Parasnis, 1997). Este pulso, durando somente alguns nanossegundos, viajará no material até que encontre um limite onde as constantes dielétricas diferem. Uma parcela do

sinal é transmitida para a segunda camada e uma parcela é refletida à superfície e detectada por uma antena de recepção (figura 8).

Uma bobina receptora fará a detecção do novo sinal (campo primário mais o secundário). Essa bobina é posta separada da transmissora por distância fixa ou variável, e irá captar o resultado da interação entre os campos primário e secundário, ampliando-o e comparando-o com o campo original. Deve-se levar sempre em conta que a detecção do alvo pode ser prejudicada pela interferência de materiais condutores, em níveis mais rasos em relação ao alvo de interesse.

O método eletromagnético pode ser classificado em contínuo ou transiente segundo a classificação de Telford (1990). O método contínuo onde o sistema transmite e recebe determinada frequência em um dado tempo pode operar com frequências relativamente baixas (100 Hz a 4 KHz). Já o método transiente tem a característica de operar no domínio do tempo e consiste na transmissão de pulsos transientes, de frequências mais altas (> 10 KHz).

Dentre as diversas técnicas geofísicas que aplicam o eletromagnetismo temos o GPR que foi utilizado neste trabalho e que será detalhado a seguir.



**Figura 8:** Transmissão e recepção eletromagnética.

Fonte: <http://www.georadar.com/howitwrk.htm>

## Capítulo II – Radar de Penetração no Solo (GPR)

### 2.1 – Princípios Básicos

#### 2.1.1 – Propagação de Ondas Eletromagnéticas

O radar de penetração no solo, ou como no Brasil é mais conhecido “GEORADAR”, emprega freqüentemente ondas eletromagnéticas com altas freqüências (10 a 2000 MHz), correspondentes às ondas de rádio no espectro eletromagnético.

Um campo eletromagnético se propagando, interage com o meio sofrendo espalhamento e atenuação. Esse fenômeno de propagação de uma onda eletromagnética é baseado nas equações de Maxwell que descrevem a indução eletromagnética ocasionada por um campo elétrico no vácuo (da Costa, 2002).

Uma série de parâmetros inerente dessas equações é relativa ao meio no qual é feita a propagação, ou seja, as propriedades magnéticas (**permeabilidade magnética**) e às propriedades elétricas do mesmo (**condutividade e constante dielétrica ou permissividade dielétrica**). Estas relações são descritas na equação 1 abaixo:

$$W(x,t) = e^{i(kx+wt)}$$

$$k = (w^2\epsilon\mu + iw\mu\sigma)^{1/2}$$
$$k = w/v + i\alpha$$

(1)

t - tempo  
k - número de onda  
v - velocidade da onda  
w - freqüência angular  
 $\alpha$  - atenuação  
 $\sigma$  - condutividade  
 $\mu$  - permeabilidade magnética  
 $\epsilon$  - permissividade

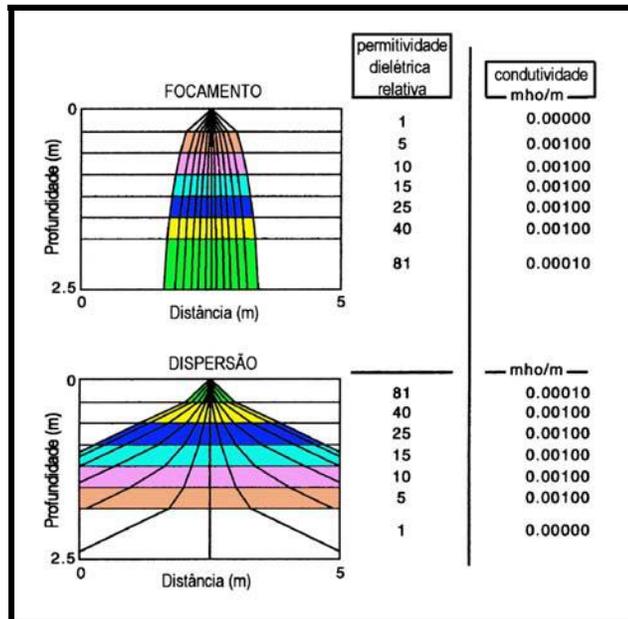
A lei de Snell nos diz que uma onda incidente sobre uma interface que separa meios com propriedades eletromagnéticas diferentes, será parcialmente refletida e refratada.

A fórmula de Snell (equação 2) descreve uma relação entre a reflexão, a refração e os ângulos de incidência (igual ao ângulo de reflexão) e refração para meios com características físicas diferentes:

$$\frac{\text{Sen } \phi_1}{\text{Sen } \phi_2} = \frac{V_1}{V_2} \quad (2)$$

$\phi_1$  = ângulo de incidência     $V_1$  = Velocidade do meio 1  
 $\phi_2$  = ângulo de refração     $V_2$  = Velocidade do meio 2

Na lei de Snell, a quantidade de reflexão ou refração que irá ocorrer no limite entre dois meios, depende do ângulo de incidência e da velocidade de propagação das ondas. Em geral, com o aumento da permissividade relativa ( $\epsilon$ ), maior fica o cone de transmissão. O oposto pode ocorrer se os materiais gradualmente diminuem sua permissividade relativa, neste caso, o cone de transmissão expande-se em profundidade como mostra a figura 9.



**Figura 9:** O gráfico demonstra o efeito da variação da permissividade dielétrica (permissividade dielétrica) na forma do cone de irradiação da energia eletromagnética emitida pelo radar. Para o aumento da permissividade dielétrica nas camadas em subsuperfície existe um estreitamento do cone de irradiação. O cone irá se comporta de maneira oposta, ou seja, alargamento da área de irradiação, com a diminuição da permissividade dielétrica para as camadas mais profundas. Fonte: (Conyers & Goodman (1997) in Madeira (2002)).

O que determina a velocidade, a energia refletida e a atenuação do sinal são as propriedades eletromagnéticas do meio. São elas:

**a) permissividade dielétrica ( $\epsilon$ ):** é um parâmetro de proporcionalidade que relaciona o campo elétrico com a corrente de deslocamento porém, o que é usado na prática é a razão entre esse parâmetro, no material analisado e no vácuo, o que é chamado de **constante dielétrica (K)**. Essa está diretamente relacionada com a velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas, sendo um parâmetro complexo que descreve as propriedades elétricas dos materiais submetidos a frequências elevadas. Em meios naturais, a corrente que flui em resposta à aplicação de um campo eletromagnético é uma mistura da corrente de condução com a de deslocamento. Estas relações físicas estão descritas em detalhe na equação 3 a seguir:

$$J = J_C + J_D = \sigma E + \epsilon \frac{dE}{dt} \quad (3)$$

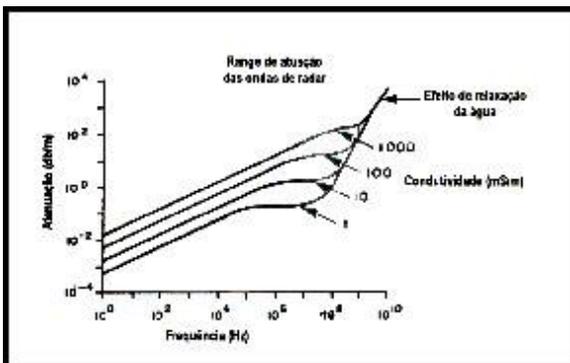
Onde:

- J - corrente elétrica
- $J_C$  - corrente de condução
- $J_D$  - corrente de deslocamento
- $\sigma$  - condutividade
- $\epsilon$  - permissividade dielétrica
- E - campo elétrico
- t - tempo

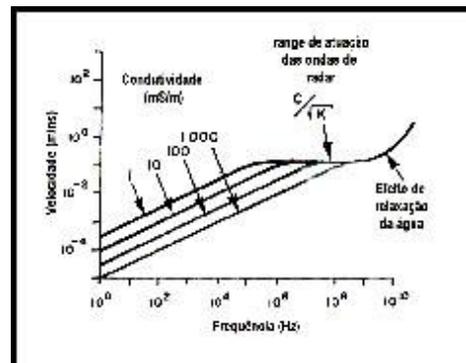
**b) condutividade:** a facilidade que um meio tem de conduzir eletricidade é chamada de condutividade ( $\sigma$ ). Esta propriedade elétrica do meio é de extrema importância para a propagação de ondas eletromagnéticas, como citado por Davis & Annan (1989). A interação do campo eletromagnético com meios que apresentam condutividade elevada ocasiona uma perda de energia por atenuação, a qual aumenta muito para valores de frequência muito alta, como é mostrado na figura 10. Isto mostra que fica limitada à aplicação da técnica de GPR em meios muito condutivos. Por exemplo: ambientes salinos, por apresentarem alta condutividade, a onda eletromagnética sofreria grande atenuação.

As ondas eletromagnéticas com frequências da ordem de GHz, se propagam muito pouco ou até mesmo não se propagam em materiais geológicos, devido ao fato de as moléculas de água presente no meio onde se dá a propagação, sofrerem o efeito da “relaxação” devido à intensas variações na polaridade, o que gera grandes perdas de energia por atenuação.

O gráfico da figura 11 nos mostra a variação da velocidade de propagação da onda eletromagnética em função da frequência e da condutividade. Pode-se notar que entre as frequências de 1 e 1000 MHz a velocidade permanece constante para condutividades menores que 10 mS/m, indicando um patamar ideal para operar o sistema de GPR. Nesta faixa de frequência evita-se assim, a dispersão de sinal ocasionada pela variação de velocidade com a frequência e também o efeito de “relaxação” da molécula de água, para frequências muito maiores que 1000 MHz.



**Figura 10:** Relação entre frequência, condutividade e atenuação. Fonte: (Davis & Annan, 1989).



**Figura 11:** Variação da velocidade de propagação com a frequência, para valores de condutividade. Fonte: Davis & Annan, (1989).

A partir da determinação da permissividade relativa do meio, é possível estabelecer diretamente as velocidades de propagação da onda eletromagnética nos diversos materiais; este experimento pode ser feito no campo, no laboratório ou até mesmo de maneira indireta, com o uso do GPR através de certos arranjos, o que será visto no item 2.3.1. (Análise de Velocidade).

A tabela 1 apresenta a variação dos parâmetros: condutividade ( $\sigma$  - mS/m), constante dielétrica (parte real,  $K'$  – adimensional), velocidade de propagação ( $V$  – m/ns) e atenuação ( $A$  – dB/m) para diversos materiais geológicos, (Da Costa, 2002). Pode-se observar que com o aumento do valor da constante dielétrica, a velocidade da propagação da onda decresce e também que os materiais mais condutivos são os que possuem maior atenuação.

MATERIAL	$K'$	$\sigma'$ (mS/m)	$V$ (m/ns)	$A$ (dB/m)
<i>Ar</i>	1	0	0,3	0
<i>Água destilada</i>	80	0,01	0,033	$2 \times 10^{-3}$
<i>Água doce</i>	80	0,5	0,033	0,1
<i>Água salgada</i>	80	$3 \times 10^3$	0,01	$10^3$
<i>Areia seca</i>	3-5	0,01	0,15	0,01
<i>Areia saturada</i>	20-30	0,1-1	0,06	0,03-0,3
<i>Calcário</i>	4-8	0,5-2	0,12	0,4-1
<i>Folhelhos</i>	5-15	1-100	0,09	1-100
<i>Siltos</i>	5-30	1-100	0,07	1-100
<i>Argilas</i>	5-40	2-1000	0,06	1-300
<i>Granito</i>	4-6	0,01-1	0,13	0,01-1
<i>Mineral salino seco</i>	5-6	0,01-1	0,13	0,01-1
<i>Gelo</i>	3-4	0,01	0,16	0,01

**Tabela 1:** Relação entre os valores típicos dos parâmetros eletromagnéticos para alguns materiais geológicos. Fonte: (Modificado de Davis & Annan, 1989).

## 2.1.2 – Parâmetros que Influenciam na Aquisição de Dados com o GPR

### a) O Uso do Equipamento

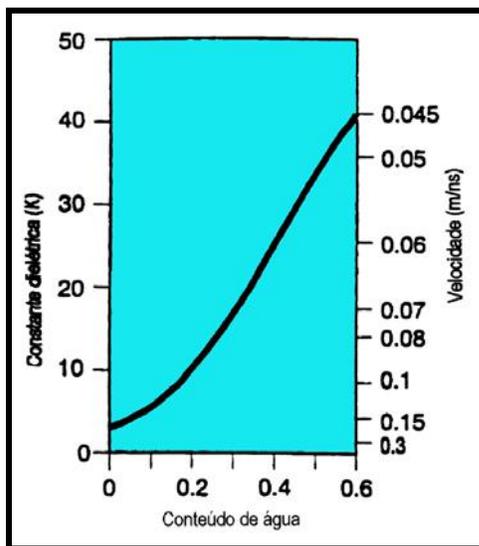
Alguns parâmetros inerentes ao equipamento utilizado influenciam totalmente nos resultados obtidos nos levantamentos; tais como, a frequência da antena, intervalo de amostragem, a resolução (não depende somente do equipamento), etc; o que será melhor discutido nos itens 2.2 (Características do sistema GPR) e 2.3 (Processamento de dados de GPR). O acoplamento da antena com a superfície do terreno também influencia na qualidade dos dados adquiridos pois, para que se evite ou se minimize a perda de energia é necessário que se reduza ao máximo os espaços existentes entre a antena e a superfície,

(Herman, 1997) ou seja, deve-se fazer o levantamento sempre com a antena mais próxima possível da superfície do terreno.

Além disto, vale lembrar alguns outros problemas operacionais do equipamento; por exemplo: no levantamento realizado em Resende (afloramento estudado), observamos que a prolongada exposição ao Sol de todo equipamento fazia com que o mesmo apresentasse pane devida principalmente ao aquecimento dos cabos de fibra ótica, esses após serem trocados muitas vezes viabilizava o equipamento.

## b) Água

Em materiais geológicos, a presença de água é um fator de suma importância na definição das suas propriedades elétricas, pois acarretará em um aumento na atenuação do sinal devido às moléculas da água tenderem a aumentar a constante dielétrica e a condutividade dos materiais como pode ser visto na figura 12.



**Figura 12:** Gráfico da relação da constante dielétrica (k) pelo conteúdo de água. Notar a relação direta entre a constante e o conteúdo de água. Fonte: (Annan (1992) in Madeira (2002)).

## c) Sedimentos Argilosos

Sedimentos finos e argilosos tornam-se extremamente condutores pelo fato de as argilas apresentarem sua superfície eletricamente carregada devido à presença de íons, produzindo um mecanismo de condutividade superficial (Mitchell, 1993). Condutores são conseqüentemente, dissipadores de energia eletromagnética. Isto gera a impossibilidade de propagação de energia nas camadas de argila muito espessas o que acarreta um mascaramento dos sinais presentes nos registros de radar abaixo dessa camada. Porém, Ulriksen (1982), afirma que se for muito fina a camada de argila, parte da energia poderia atravessá-la (isso tem relação com o comprimento de onda dos pulsos eletromagnéticos).

## d) Sedimentos Arenosos

Por sua vez os sedimentos arenosos não geram empecilhos para a aquisição de dados com o GPR, visto que as areias apresentam baixa condutividade (baixa atenuação), possibilitando bons resultados e um bom aproveitamento quanto à profundidade de investigação. Se os sedimentos arenosos se apresentarem encharcados de água, como já foi dito anteriormente haverá um aumento da condutividade o que acarretará perda de sinal.

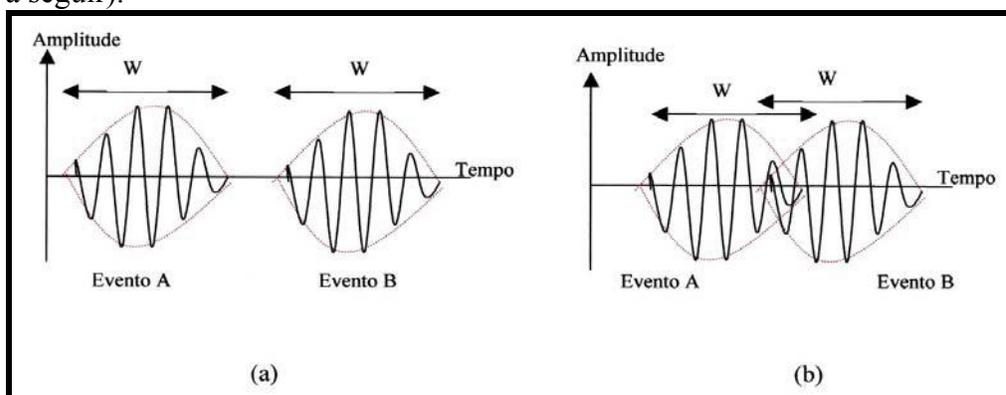
## 2.2 – Características do sistema GPR

### 2.2.1 – Pulso Eletromagnético e a Resolução

Intimamente ligada à frequência do pulso eletromagnético está a resolução, pois quanto maior for a frequência utilizada menor será o comprimento de onda e maior a resolução. A profundidade de investigação também é função da frequência utilizada.

A resolução está associada à capacidade do sistema de radar distinguir dois pulsos eletromagnéticos relacionados a dois eventos que são marcados em tempos próximos. Sabe-se que no radargrama está registrado o tempo duplo da trajetória realizada pelo pulso eletromagnético desde a emissão da antena transmissora até atingir a interface de reflexão e por fim retornar a superfície, sendo captado pela antena receptora.

Normalmente é registrada a variação de amplitude versus o tempo do pulso eletromagnético. Da Costa (2002) chama atenção para o fato de que um evento só poderá ser individualizado em um registro de radar se a separação em tempo, entre eles, for maior do que a metade da largura da envoltória do pulso. Isto pode ser visto na figura 13 abaixo. Esse fato nos mostra a limitação do uso do GPR, quando os objetos são muitos pequenos ou as camadas geológicas são estratigraficamente finas, só podem ser identificados em frequências mais elevadas. Portanto, devem estar muito próximas da superfície (item 2.2.2 a seguir).



**Figura 13:** Representação de dois eventos correspondentes a pulsos eletromagnéticos.

Fonte: (Telford, 1990)

Na figura 13 podemos ver a representação de dois eventos distintos de pulsos eletromagnéticos. Na primeira situação (a) podem ser claramente individualizados, devido às envoltórias referentes aos eventos A e B estarem bem separadas no tempo; já no segundo caso (b) as envoltórias estão se sobrepondo dificultando totalmente a individualização do evento.

### 2.2.2 – Alcance Atingido por um Sinal Eletromagnético

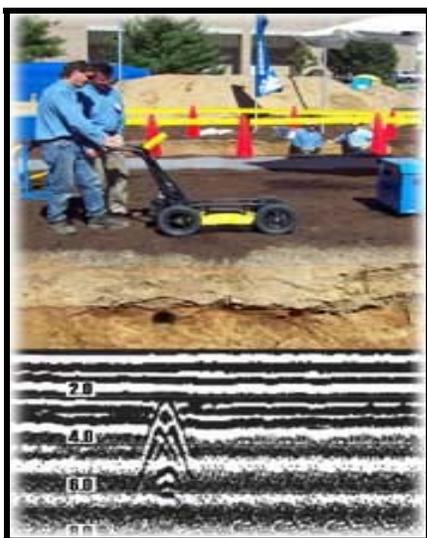
Antes do levantamento com o GPR é necessário que se conheça, ainda que de forma aproximada, dimensões e/ou profundidade do alvo a ser investigado, além das características eletromagnéticas do meio. O alcance em profundidade do sinal eletromagnético é função das propriedades físicas do meio.

Verificou-se que com o aumento da frequência e também da condutividade do meio a atenuação se fará mais forte impossibilitando a penetração em maiores profundidades ficando restrita a níveis muito rasos; o oposto também é valido visto que ao se empregar frequências baixas, a atenuação é menor, possibilitando um maior alcance, porém com baixa resolução. As equações físicas que descrevem estas diversas situações serão vistas mais à frente.

### 2.2.3 – O Equipamento

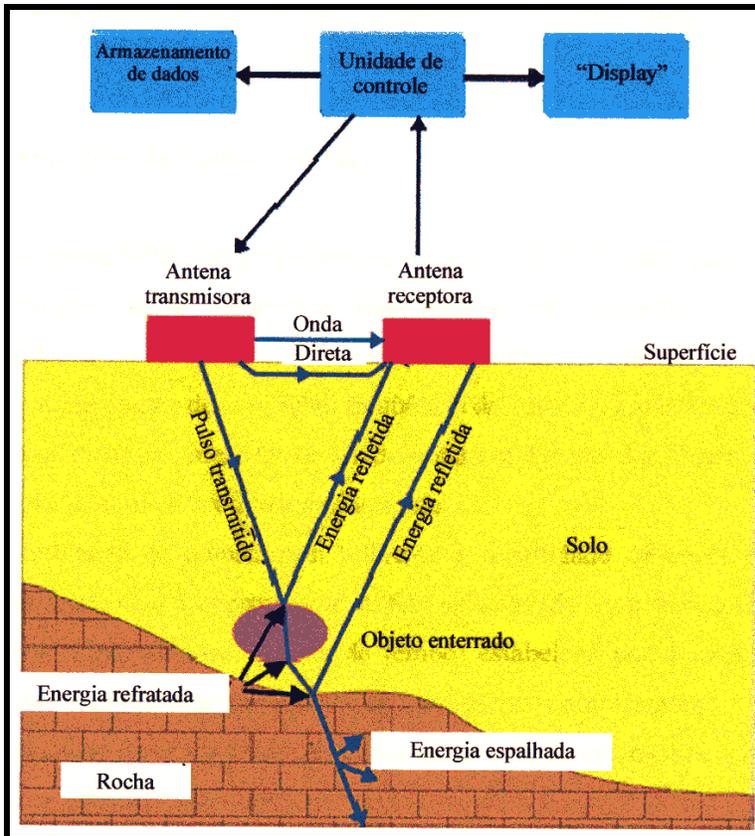
O equipamento GPR (figura 14) é composto por uma unidade de controle (console central), unidades múltiplas de geração e captação do pulso eletromagnético, antenas transmissora e receptora ligadas a unidade de controle por cabos, (normalmente de fibra óptica) e um transmissor de imagens para a visualização e processamentos preliminares (nos modelos mais modernos) podendo estar ou não embutido no próprio equipamento; como um “lap-top”, por exemplo. Os sistemas de GPR podem ser monoestáticos ou biestáticos: no primeiro é utilizada uma única antena para transmissão e recepção do pulso eletromagnético, no segundo é utilizado um par de antenas no qual, uma é a transmissora e a outra a receptora, o que segundo Parasnis (1997), melhora significativamente o sinal e diminui os ruídos (figura 15).

Por exemplo, nesta monografia utilizou-se no levantamento de campo o sistema GPR **PulseEkko IV** pertencente ao departamento de Geologia da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Este é um sistema biestático, utilizando um par de antenas de 100 MHz (uma é a transmissora e outra a receptora).



**Figura 14:** Foto de um equipamento de GPR sendo utilizado em um levantamento.

Fonte: <http://www.sensoft.ca/applications/index.html>



**Figura 15:** Esquema de representação sintetizando os diversos componentes de sistema de GPR biestático e a propagação do pulso eletromagnético no subsolo. Fonte: (Smemo, 2000 in Da Costa, 2002).

#### 2.2.4 – Arranjos para a aquisição dos dados

Existem diversos arranjos para o conjunto de antenas transmissora e receptora, a exemplo da sísmica (fonte e receptor nos levantamentos de campo). A seguir serão apresentadas figuras ilustrativas de como os trabalhos de campo são realizados.

Antes de se iniciar o levantamento há a necessidade de se checar os diversos parâmetros que deverão ser ajustados. Este procedimento é realizado através de “software” especialmente desenvolvido para cada modelo de equipamento. No campo devem ser observadas as particularidades do levantamento, tais como: frequência de amostragem, frequência da onda transmitida, “time window” e distância entre pontos de aquisição. As tabelas 2 e 3 mostram a associação entre frequência da antena e espaçamento máximo entre os pontos de aquisição de dados e a relação entre a frequência das antenas e a separação entre elas.

A frequência de amostragem diz respeito à quantidade de vezes em que o pulso eletromagnético que chega na antena receptora é registrado. Este parâmetro está relacionado também com a frequência da onda.

A frequência da antena será sempre definida em função das dimensões e profundidade do alvo.

O parâmetro “time Window” ou janela de tempo é o que irá determinar por quanto tempo um pulso eletromagnético transmitido será registrado dependendo sempre da frequência de amostragem.

<b>Frequência (MHz)</b>	<b>Espaçamento máximo (m)</b>
12.5	2.0
25	1.0
50	0.5
100	0.25
200	0.10
450	0.05
900	0.02

**Tabela 2:** Relação entre frequência das antenas e o parâmetro espaçamento máximo entre as estações. Fonte: modificado de Annan, (1992).

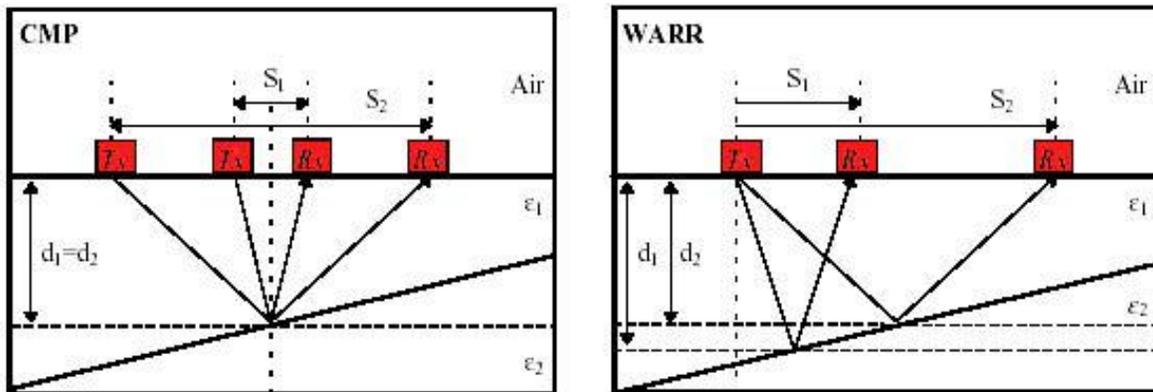
<b>Frequência (MHz)</b>	<b>Separação de Antenas (m)</b>
12.5	8.0
25	4.0
50	2.0
100	1.0
200	0.5
450	0.25
900	0.17

**Tabela 3:** Relação entre a frequência usada e o parâmetro de separação de antenas. Fonte: modificado de Annan (1992).

Ajustando-se todos os parâmetros mencionados, o próximo passo será o arranjo das antenas, esses são basicamente 4 (quatro) – além do GPR para poço:

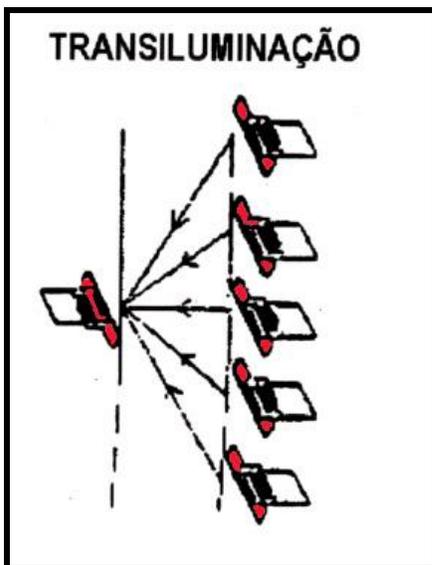
- **“Common Mid Point” (CMP) e “Wide Angle Reflection and Refraction” (WARR)** – Para o cálculo da profundidade do alvo investigado é necessário o conhecimento da velocidade de propagação da onda eletromagnética no meio estudado. Com este objetivo são utilizados os arranjos CMP e WARR. Esses tipos de arranjos possibilitam conhecer, ainda que de forma estimada, a velocidade de propagação da onda

eletromagnética. No modo de arranjo WARR a antena receptora é deslocada ao longo do perfil enquanto que a transmissora é mantida fixa. No arranjo CMP, as antenas transmissora e receptora são deslocadas simetricamente a partir de um ponto central (figura 16). É importante frisar que em ambos os arranjos o que se determina é o tempo de propagação da onda correspondente a cada posição das antenas. Partindo-se desse princípio, podemos estimar as velocidades de propagação da onda direta no ar, na interface ar/solo e também da onda refletida nas discontinuidades eletromagnéticas de subsuperfície.



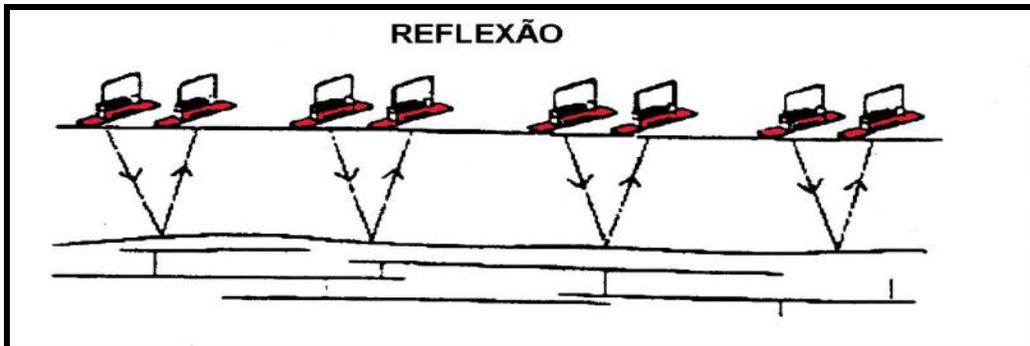
**Figura 16:** Modelo de caminhos percorridos pelas frentes de onda, em prospecções do tipo CMP e WARR. Fonte: Annan (1992), sem tradução para o português.

- **Transluminância** - Este arranjo é empregado com o objetivo de caracterizar feições de pequeno porte, como, por exemplo, pequenas fissuras em pilares. A antena receptora fica fixa enquanto a antena transmissora é deslocada em posição simetricamente oposta, como mostra a figura 17.



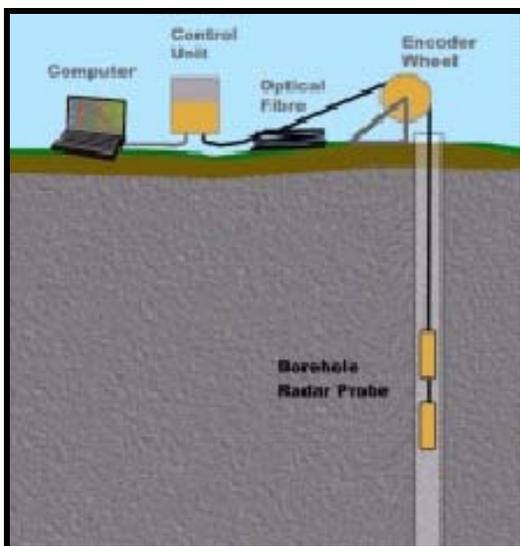
**Figura 17:** Representação esquemática do método de trans-iluminação. Fonte: Annan (1992) in Cezar (2001).

- **Reflexão** – Neste arranjo desloca-se juntamente as antenas receptora e transmissora ao longo de um perfil, de modo que o espaçamento entre essas antenas seja mantido constante (figura 20). Esse tipo de arranjo assemelha-se a reflexão sísmica.



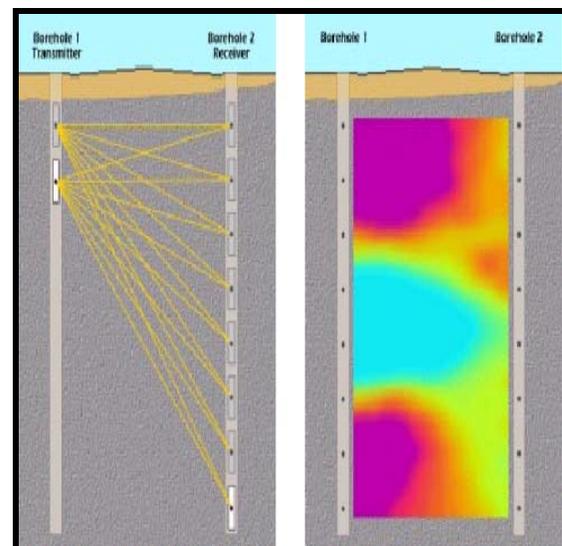
**Figura 20:** Representação esquemática do método de afastamento constante. Fonte: Modificado de Annan (1992) in Madeira (2002).

- **Radar de Poço** – A técnica de radar de poço é um caso especial de GPR distinto do equipamento utilizado em superfície, (Wänstedt et al, 2000). Nesse caso o GPR é colocado dentro de um furo de sondagem e as antenas são dispostas uma em cima da outra, em contato com a parede do furo. Durante o levantamento as antenas são progressivamente abaixadas (Da Costa, 2002). Como é possível posicionar as antenas mais próximas do alvo de investigação, obtêm-se assim, respostas bem mais precisas do alvo. Pode-se ainda variar o levantamento dispondo das antenas transmissora e receptora em furos diferentes, o que permite realizar medições cruzadas complementando os dados adquiridos com um único furo. As figuras 18 e 19 ilustram respectivamente o caso de um único poço e o levantamento realizado entre 2 poços.



**Figura 18:** Figura mostrando a aplicação da técnica de radar de poço.

Fonte: <http://ramac.malags.com/>



**Figura 19:** Variação da técnica utilizando-se o “crosshole”.

Fonte: <http://ramac.malags.com/>

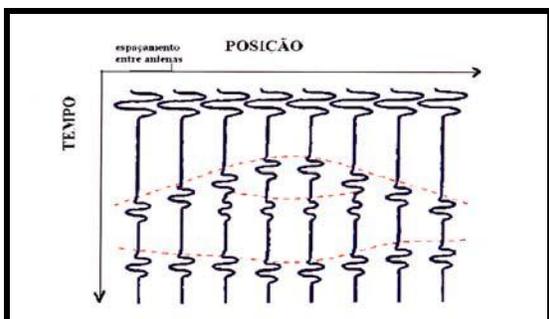
### 2.2.5 – Radargrama

O radargrama é a representação gráfica dos dados de radar. O eixo horizontal representa a extensão do levantamento e mostra a variação lateral em intensidade do sinal da onda eletromagnética; já o eixo vertical, normalmente indica o tempo total (duplo) da trajetória da onda, ou seja, tempo despendido para que a onda seja transmitida, sofra reflexão e seja registrada na superfície.

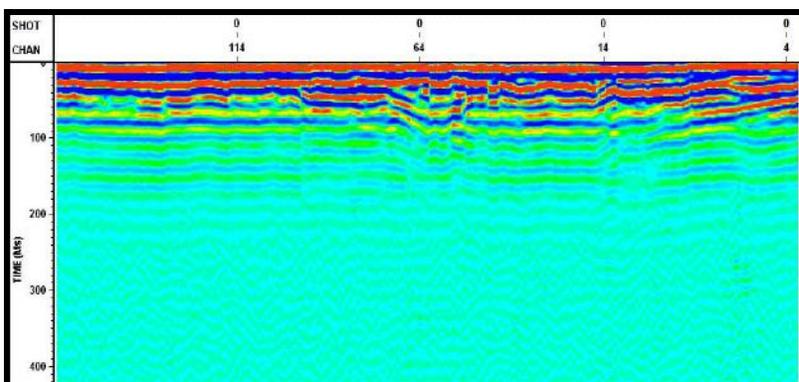
A partir da plotagem de todos os traços sucessivos ao longo da seção de campo é feita a apresentação dos dados ou “display”.

É comum se observar feições hiperbólicas nos radargramas que são associadas a pulsos refletidos em tempos diferentes. Observa-se uma variação passando de valores menores, ao longo do perfil, até uma posição onde passam a ter valores crescentes. Isto representa uma aproximação e posterior afastamento de uma anomalia eletromagnética conforme mostra a figura 21.

Nesse trabalho, optou-se também por apresentar os dados com amplitudes em escala de cores: vermelhas para amplitudes positivas e tons de azul para negativas. Exemplo deste tipo de representação gráfica é mostrado na figura 22, que corresponde a um levantamento no perfil estudado.



**Figura 21:** Seção de radargrama onde se observam formas hiperbólicas originadas pela aproximação e posterior afastamento de uma anomalia eletromagnética (Davis & Annan, 1989).



**Figura 22:** Radargrama correspondente ao levantamento com GPR realizado no afloramento estudado (figura 1) plotado com amplitudes em escala de cores.

Podem-se também originar imagens tridimensionais. Para isto é necessário um levantamento de campo detalhado, ou seja, com linhas de aquisição de dados pouco espaçadas e com intervalo de coleta muito pequeno. Esta técnica possibilita uma melhor visualização de pontos e ainda permite a visualização de “cortes” verticais e horizontais (“time slices”).

## **2.3 – Processamento de dados de GPR**

O processamento de dados geofísicos caracteriza-se por um conjunto de etapas que são realizadas por “softwares” próprios para processamento e que oferecem múltiplas formas de tratamento de dados sendo capazes de minimizar os efeitos considerados ruins do levantamento. É possível minimizar ou reduzir muito, as influências de estruturas superficiais nas seções de radar e, amplificar as estruturas subterrâneas que são o alvo do estudo.

O processamento é composto por etapas que são divididas nas categorias: básica e avançada, segundo Annan (1992). Primeiramente é feito um processamento básico que pode ser aplicado inclusive durante a aquisição no campo, permitindo uma visualização dos dados em tempo real.

O processamento avançado acarreta uma total alteração do dado original, devendo ser executado somente se necessário, e com total certeza e segurança dos parâmetros analisados.

São muitas as etapas do processamento. A seguir resumimos as mais importantes ou as mais utilizadas no processamento básico que foi a categoria utilizada nesse trabalho:

### **2.3.1 - Análise de Velocidades**

Como já mencionado anteriormente, são mostradas nos radargramas feições hiperbólicas que são associadas a pulsos refletidos em tempos progressivamente menores, ao longo do perfil, até uma posição onde passam a ter valores crescentes. Analisando essas hipérbolas de tempo por separação entre as antenas obtidas por prospecção do tipo CMP/WARR, é viável obter uma estimativa da velocidade da onda de radar no subsolo. A velocidade que servirá de parâmetro para o cálculo de profundidade será uma média das velocidades de propagação nas camadas no subsolo.

Um modo simples, porém perigoso de se obter uma velocidade de propagação é calculando a velocidade de propagação da onda direta no solo; isto pode ser feito tendo-se o cuidado de se calibrar a profundidade da seção com estruturas ou superfícies que podem ser relacionadas a um certo controle de profundidade com afloramentos ou furos de sondagens. Esse método também foi utilizado nesse trabalho uma vez que as estruturas presentes no afloramento possuem um controle de profundidade em relação à superfície.

A velocidade de propagação no subsolo de uma onda eletromagnética, assim como a profundidade de um refletor, podem ser obtidos através das seguintes equações:

### ***Velocidade da Onda no Meio:***

$$v = \frac{(x^2 + 4d^2)^{1/2}}{t} \quad (5)$$

**t** - tempo  
**v** - velocidade da onda no meio  
**x** - distância entre as estações  
**d** - profundidade do refletor

### ***Profundidade de um Refletor:***

$$Z = \sqrt{\frac{t_2^2 x_1^2 - t_1^2 x_2^2}{4(t_1^2 - t_2^2)}} \quad (6)$$

**z** - distância até a reflexão  
**t<sub>1</sub>** - tempo de ida e volta na leitura 1  
**t<sub>2</sub>** - tempo de ida e volta na leitura 2  
**x<sub>1</sub>** - distância entre as antenas na leitura 1  
**x<sub>2</sub>** - distância entre as antenas na leitura 2

### **2.3.2 – Dewow**

Essa etapa consiste na remoção do efeito “wow” que é caracterizado por um ruído de baixa frequência que normalmente está associado a fenômenos de indução eletromagnética ou também influências do próprio aparelho. Esses ruídos de baixas frequências saturam os componentes eletrônicos e interferem no radargrama de modo que devem ser removidos logo na primeira etapa do processamento (manual do “software” Gradix, 1996).

### **2.3.3 – Declip**

Essa função tem por finalidade, restaurar por interpolação, a forma das primeiras ondas refletidas que tendem a aparecerem truncadas e com a aparência de ondas quadradas de altas frequências. Essas aparecem truncadas pelo fato da energia refletida ser muito menor que as amplitudes das ondas diretas no ar e no solo. A função “declip” deve ser aplicada antes de qualquer filtragem.

### **2.3.4 – Filtros**

É a fase do processamento mais utilizada e permite retirar dos dados adquiridos, as frequências indesejadas (ruídos), ao longo do eixo temporal, o que melhora a relação sinal / ruído. Esses são chamados filtros temporais.

Outros filtros aplicados no domínio do espaço são chamados de filtros espaciais. Entre esses podemos destacar principalmente dois tipos:

- 1) Passa-alta – mantendo as frequências altas este vêm a realçar as feições inclinadas e suprimir as horizontais vistas no radargrama;
- 2) Passa-baixa – mantendo as frequências baixas este vêm a realçar as feições horizontais com continuidade vistas no radargrama.

Para a utilização de um filtro é necessário que se tenha um conhecimento preliminar do subsolo para que sejam realçadas as feições correspondentes aos alvos, pois seu emprego depende das características do meio onde os dados foram adquiridos.

### **2.3.5 - Ganho**

Pelo fato de as ondas de radar se atenuarem muito rapidamente no subsolo, a amplitude dos sinais oriundos de grandes profundidades é muito pequena acarretando uma visualização muito ruim dessa informação. Dessa forma, torna-se necessário equalizar as amplitudes ou aplicar um ganho com o tempo que venha a compensar essa rápida atenuação dos sinais de radar em profundidade.

## Capítulo III – Metodologia Utilizada

### 3.1 – Introdução

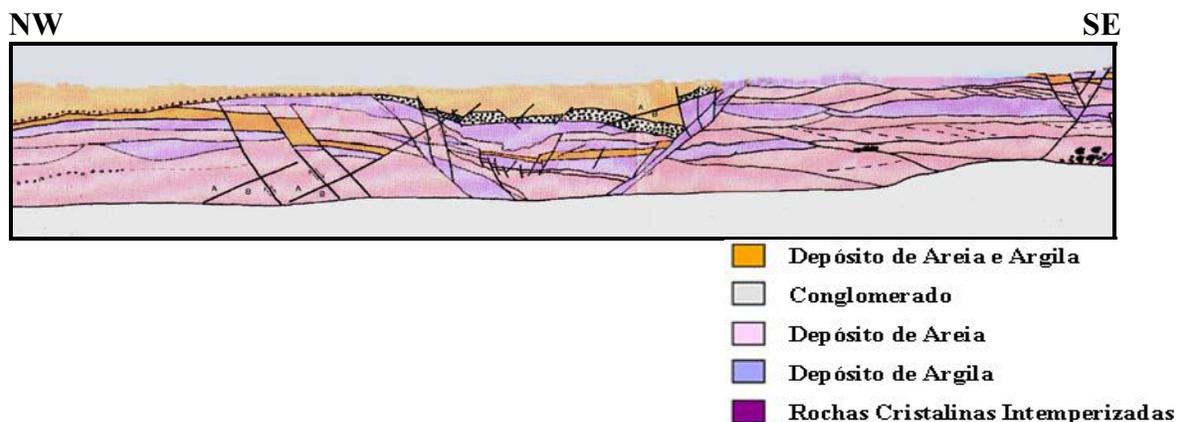
A princípio foi feita uma pesquisa bibliográfica com o objetivo de decidir qual seria o melhor local para o levantamento geofísico, utilizando a técnica do GPR, destacando-se os trabalhos de Ramos (2002) em afloramentos da bacia de Resende. Este trabalho gerou imenso interesse devido a riqueza de estruturas presentes nesses afloramentos. A partir desse ponto, a questão pendente era a viabilidade do uso do equipamento de radar nesses afloramentos. Levantou-se ainda o trabalho de Madeira (2002) que tinha feito seções com o GPR em alguns afloramentos da bacia de Resende com as mesmas características geológicas daquelas descritas por Ramos (2002).

A fase seguinte consistiu em escolher um afloramento que tivesse uma descrição geológica detalhada, e que possibilitasse a execução de uma malha de prospecção com o GPR. Foi escolhido o afloramento ao lado do sistema de comunicação Porto Real, de fácil acesso pela rodovia Presidente Dutra.

Definido o afloramento foram feitos perfis estratigráficos e medidas de estruturas utilizando-se de bússola e trena; assim como um fotomosaico com fotografias de 10cm x 15cm com recobrimento lateral da ordem de 10% a 15%. (ver figuras 1 e 23).

O modo como foram adquiridos os dados e as etapas do processamento serão melhor detalhados nos próximos itens.

#### Modelo Geológico apresentado por Ramos (2002)



**Figura 23:** Modelo geológico e estrutural do afloramento estudado na Bc. de Resende segundo Ramos (2002).

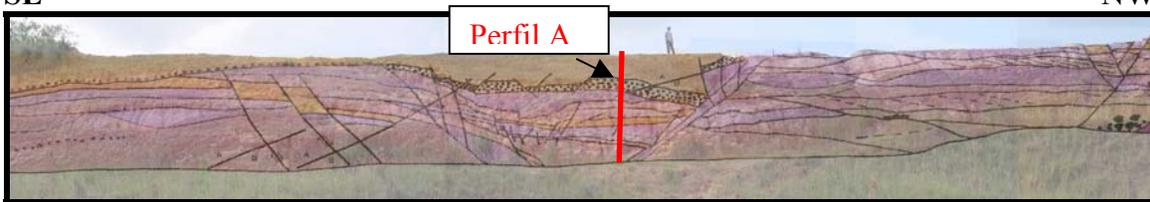
Os litossomas aflorantes nesta seção são caracterizados pelo embasamento cristalino e por uma sucessão de camadas arenosas e camadas argilo-sílticas. As camadas arenosas são compostas por areias finas a grossas amareladas e avermelhadas com grânulos e seixos dispersos e podendo conter ainda uma matriz argilosa. O embasamento aflora no canto SE.

No afloramento foram feitas medidas de falhas (strike/dip) com dois padrões distintos:

- Padrão A – (245/38, 290/45, 270/58, 270/50, 250/38 E 265/50)
- Padrão B – (85/30 e 85/40).

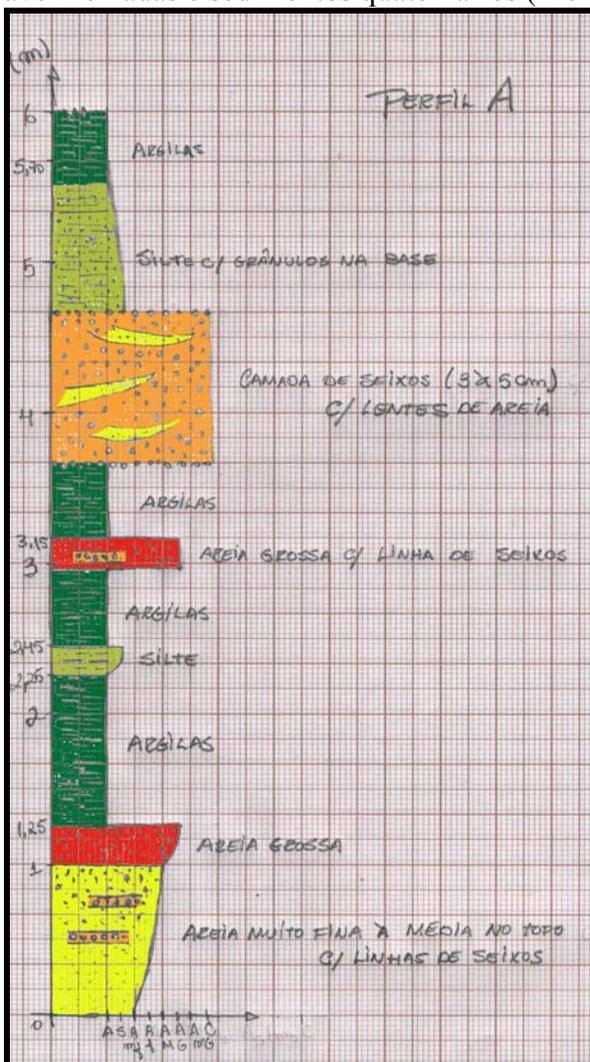
No **Anexo 2** é apresentado um estereograma que mostra mais claramente estes dois padrões de falhamentos.

O modelo geológico de Ramos (2002), foi transformado em “overlay”, e sobreposto à foto panorâmica do afloramento. Embora sejam de épocas diferentes, se adequão, e nos permitem ver as estruturas presentes no afloramento Rádio Agulhas Negras. A figura 24 abaixo mostra as semelhanças entre a foto e o modelo geológico de Ramos (2002).  
SE NW



**Figura 24:** Transformação em overlay do modelo geológico de Ramos (2002), em superposição com a foto panorâmica do afloramento da Bc. de Resende.

O perfil estratigráfico (A) marcado na figura 24 está descrito na figura 25. Vale ressaltar o nível conglomerático que marca o contato entre a parte superior alterada da Formação Resende caracterizada por uma sucessão de areias e argilas de cores avermelhadas e sedimentos quaternários (Melo et al., 1983).

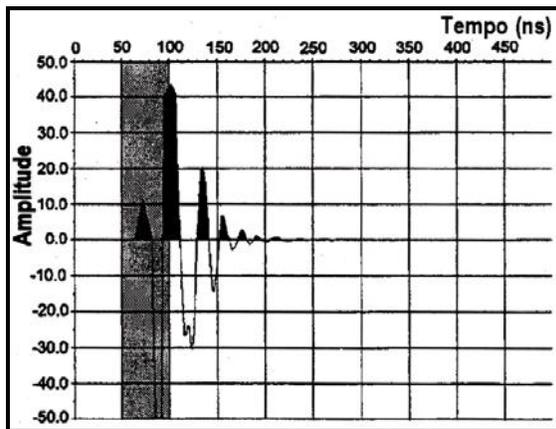


**Figura 25:** Perfil estratigráfico feito no afloramento Rádio Agulhas Negras.

### 3.2 – Aquisição dos Dados

Nesse trabalho o aparelho utilizado foi o sistema **PulseEkko IV**. Neste foi instalado o software **V4. 22** da Sensors & Software Inc. onde é possível escolher diretamente a janela de tempo e o intervalo de tempo na amostragem. Essa janela de tempo corresponde ao intervalo temporal entre o primeiro sinal refletido pelo solo até o último sinal recebido pela antena receptora. O equipamento nos permite uma escolha manual ou automática da janela de tempo. Neste trabalho foi usado o modo automático.

O tempo zero é o tempo inicial da duração do percurso em que a onda parte da antena transmissora e é recebida pela antena receptora. Refere-se também ao tempo gasto pelos componentes do sistema em realizar todas as operações de gravação do sinal. Esse tempo zero, assim como a janela de tempo, pode ser ajustada de forma manual ou automática pelo sistema PulseEkko IV; nós o ajustamos de forma automática (figura 26).



**Figura 26:** O pulso de radar mostrado no modo gráfico de um sistema PulseEkko IV, a região hachurada é correspondente a faixa onde se deve posicionar o tempo zero. Fonte: Annan (1992).

A área do levantamento corresponde a um plano acima do afloramento, com cerca de 250 m<sup>2</sup> (50m x 5m). Nessa área foram feitas **10 (dez)** linhas de GPR, paralelas, com um espaçamento entre elas de **0,5m**.

A frequência escolhida foi de **100MHz** uma vez que permitia uma boa resolução para este trabalho. O espaçamento entre as antenas transmissora e receptora de **1m** e o intervalo entre as estações de **0,25m**. A orientação das antenas em relação à seção vertical do afloramento foi perpendicular – lado a lado.

No campo, utilizou-se o modo de **reflexão** nas 10 (dez) linhas. As antenas transmissora e receptora foram deslocadas juntas e perpendiculares a direção NW – SE do afloramento. Posteriormente no mesmo local, fizemos um levantamento do tipo **WARR** para possibilitar o cálculo de velocidades. As características desses tipos de levantamentos bem como suas ilustrações podem ser vistas no item (2.2.4).

### 3.3 – Processamento dos Dados

#### 3.3.1 – Cálculo de Velocidades

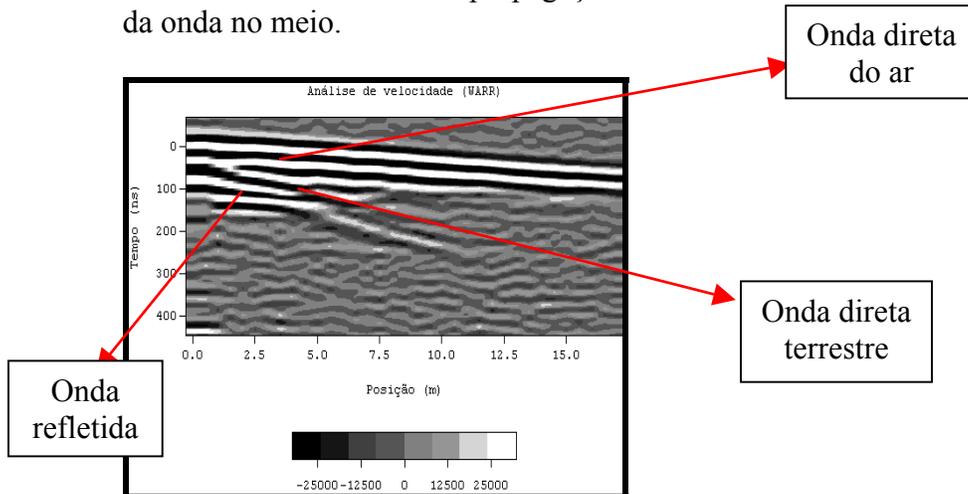
Foi realizado um levantamento do tipo WARR com o objetivo de adquirir parâmetros para o cálculo de velocidades. Na figura 27 abaixo, podemos observar a hipérbole analisada e o tempo utilizado como parâmetro. As características desse tipo de levantamento podem claramente ser vistas no item 2.2.4 (Arranjos para Aquisição dos Dados). As fórmulas usadas foram:

-Onda direta do ar:  $t = x/c$

-Onda direta terrestre:  $t = x/v$

-Onda refletida:  $t = \frac{(x^2 + 4d^2)^{1/2}}{v}$

Onde:  $c$  é a velocidade de propagação da onda no vácuo e  $v$  é a velocidade de propagação da onda no meio.



**Figura 27:** Radargrama do levantamento tipo WARR realizado no afloramento Rádio Agulhas Negras.

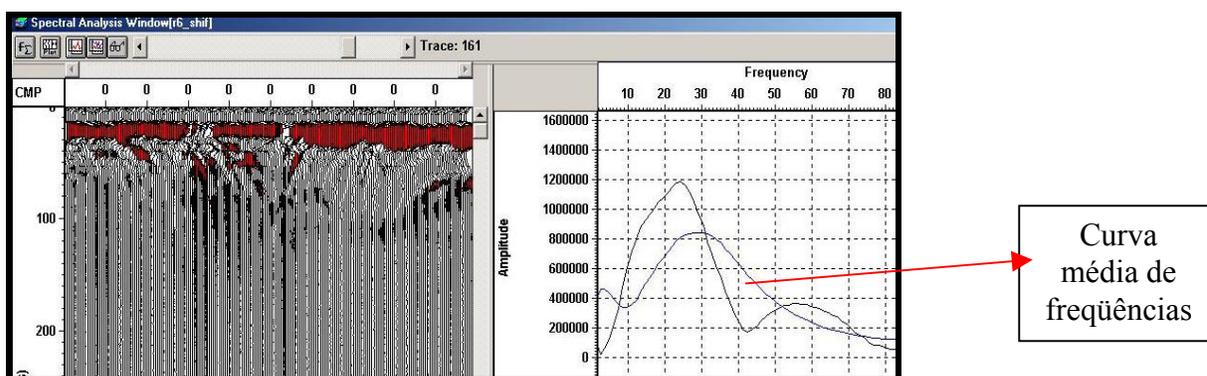
Dias et al. (2003) também calculou as velocidades para o afloramento estudado, usando o método de modelagem numérica de Diferenças Finitas no Domínio do Tempo (FDTD) com o algoritmo GPRMAX2D (Giannopoulos, 1997). Neste trabalho o autor desta monografia participou da aquisição de dados no campo (**Afloramento Rádio Agulhas Negras**), visto que foi a mesma para as seções de radargrama apresentadas mais adiante.

No **Anexo 3**, encontra-se um pequeno resumo do trabalho de Dias et al. (2003). Vale ressaltar que as velocidades calculadas neste trabalho foram bem próximas das velocidades intervalares calculadas por Dias, et al. (2003).

### 3.3.2 – Etapas do Processamento

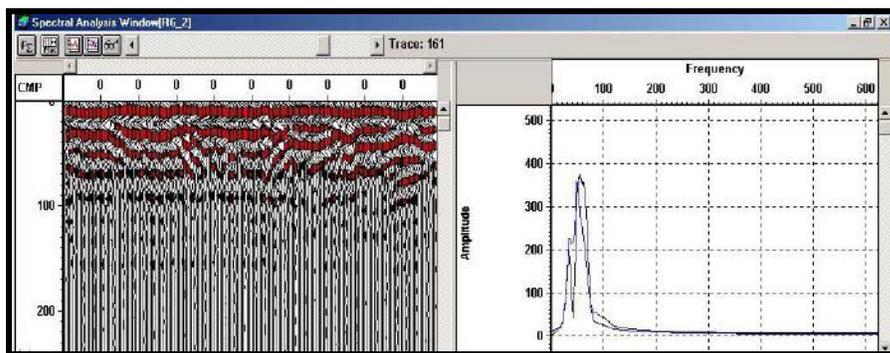
O processamento dessas linhas foi feito através do programa de processamento para dados sísmicos Vista 2D/3D 4.00. Primeiro foi feita uma análise espectral das frequências como pode ser visto nas figuras 28 e 29. A finalidade dessa análise é conhecer qual a frequência dos ruídos para que posteriormente pudéssemos eliminá-los.

Como exemplo dessas análises de frequências podemos observar a análise espectral da linha 5. Na figura 28 sem o processamento verifica-se que a curva de frequências obtidas em um traço qualquer (Ex: Traço 161) é bem diferente da curva média de frequências (em azul).



**Figura 28:** Análise de frequências para a linha 5 sem processamento.

Na figura 29, com o processamento final, pode-se observar que a curva de frequências obtidas em um traço qualquer (Ex: Traço 161) está mais próxima à curva das frequências médias (em azul).



**Figura 29:** Análise de frequências para a linha 5 com o processamento final.

Posteriormente à análise espectral de frequências foram executadas 2 (duas) etapas de processamento em todas as 10 (dez) linhas, utilizando-se o programa de processamento **Vista 2D/3D 4.00**. Tomamos essa iniciativa, pressupondo que todo o levantamento foi feito em um só dia e que devido às linhas estarem muito próximas, os ruídos presentes no campo surtiriam efeito para todas as dez linhas. Estas etapas do processamento serão detalhadas a seguir:

## ETAPA 1

Nessa primeira etapa, inicialmente utilizou-se o filtro de passa-banda trapezoidal (**Ormsby B – Vista 2D/3D 4.00**), o qual age efetuando a transformada de Fourier no sinal fazendo com que o mesmo antes em escala de tempo por amplitude passe para uma escala de amplitude por frequência; nessa escala o filtro em forma de um trapézio preservará um intervalo de frequências desejadas (25 a 40 MHz) e eliminará as demais, fazendo depois a transformada inversa de Fourier para que o sinal retorne a escala de amplitude por tempo, a qual é mostrada na seção radargrama. Depois se utilizou a aplicação do ganho (**AGC-L1 – Vista 2D/3D 4.00**), o qual têm o objetivo de amplificar o sinal das frequências desejadas. Essa filtragem com aplicação de ganho é realizada de forma estatística, sendo feitas simultaneamente quatro vezes como pode ser visto, a seguir, na figura 30 onde é mostrado o diagrama do processamento:

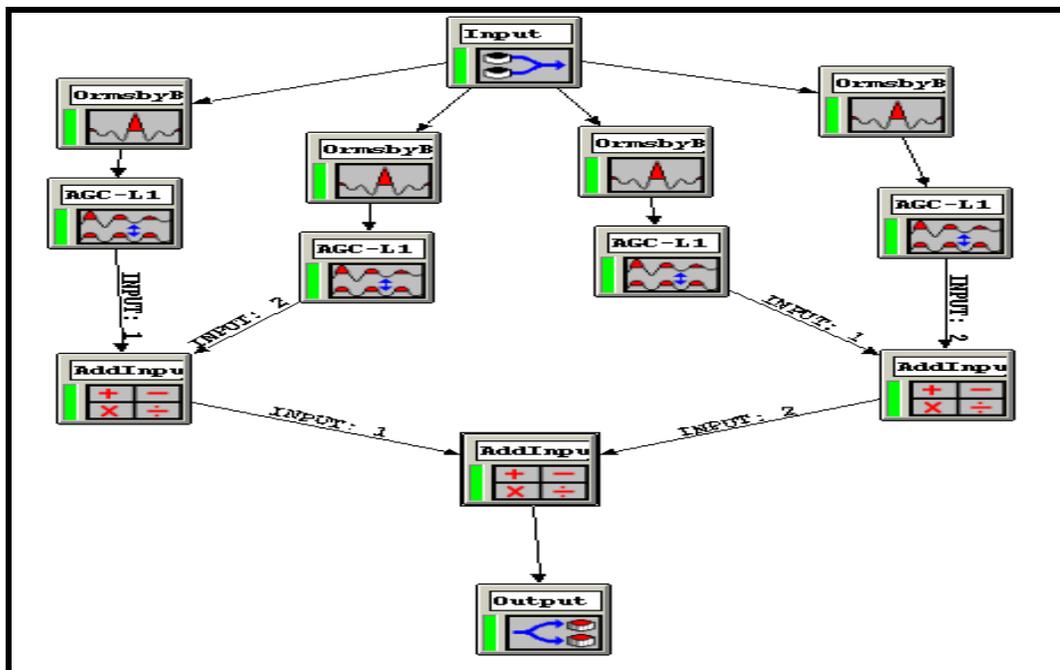
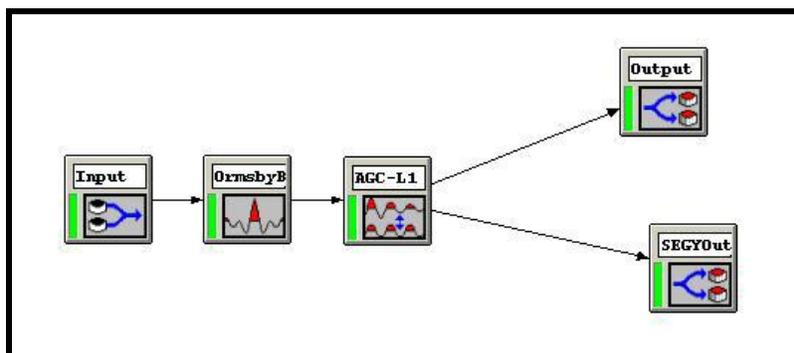


Figura 30: Diagrama da primeira etapa do processamento.

## ETAPA 2

Depois do primeiro processamento verificou-se que o sinal ainda não estava nítido na maioria das linhas, devido provavelmente, a possíveis ruídos de frequências entre 55 e 65 MHz, que mascaravam o sinal impossibilitando uma visualização contínua das camadas; optou-se novamente por passar o filtro de passa-banda trapezoidal (**Ormsby B – Vista 2D/3D 4.00**) seguido de ganho em amplitude (**AGC-L1 – Vista 2D/3D 4.00**) e ganho exponencial (**SEGYOut – Vista 2D/3D 4.00**). Com essa segunda etapa de processamento é esperada uma melhor visualização das camadas em profundidade sobretudo com

continuidade lateral. O diagrama representativo dessa segunda etapa de processamento pode ser visto a seguir na figura 31 abaixo:



**Figura 31:** Diagrama da segunda etapa de processamento.

Adiante, nesse capítulo, serão apresentadas as 10 (dez) linhas de radar, com suas variações em cada etapa de processamento. Observa-se que com a primeira etapa de processamento as linhas apresentaram feições similares porém, com a aplicação da segunda etapa onde foi utilizado o ganho exponencial (**SEGYOut – Vista 2D/3D 4.00**), observou-se uma leve mudança diferenciando as linhas estruturalmente. Isto será discutido no item 3.4 (Interpretações) e também no capítulo IV (conclusões).

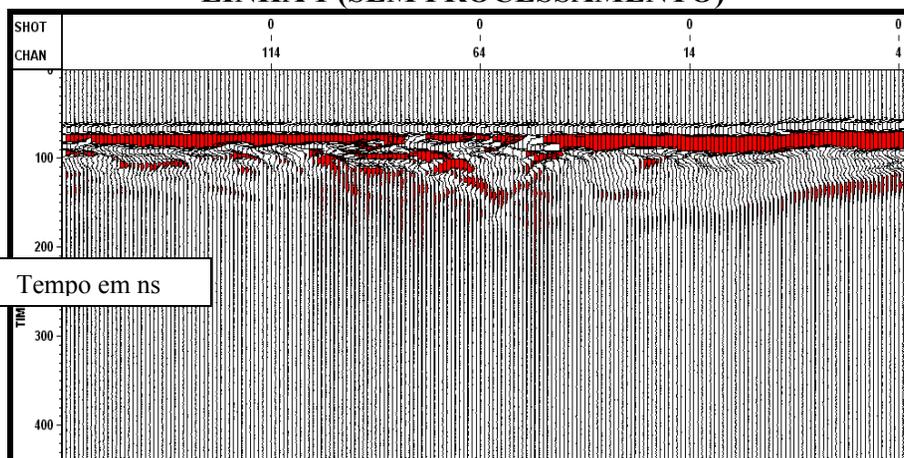
### 3.3.3 – Os Dados de Radar - Radargramas

Nas figuras 32 a 41 são apresentados os radargramas correspondentes aos levantamentos realizados nas 10 linhas já citadas anteriormente. Em cada figura são mostradas as linhas sem processamento e com as duas etapas de processamento descritas no item 3.3.2 (Etapas do Processamento).

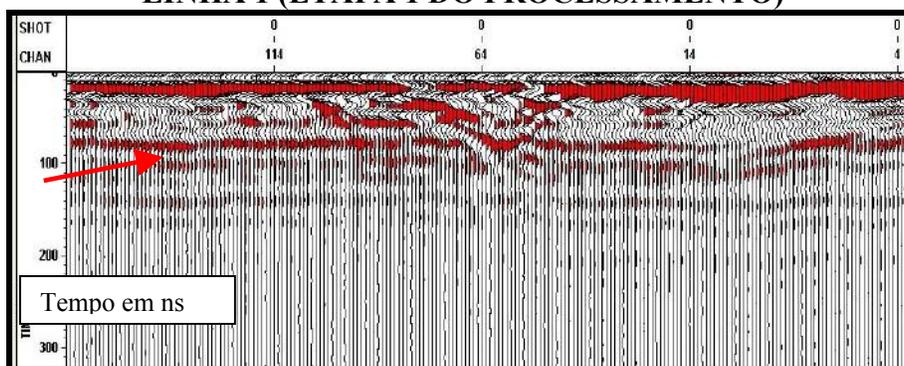
Na legenda de cada figura há uma descrição da linha sem o processamento e as modificações que ocorreram depois da aplicação das etapas 1 e 2 do processamento. Apresenta-se ainda uma discussão das variações dos padrões apresentados entre uma linha e outra.

Os eixos horizontais e verticais de cada radargrama estão respectivamente em metros (m) e nanossegundos (ns).

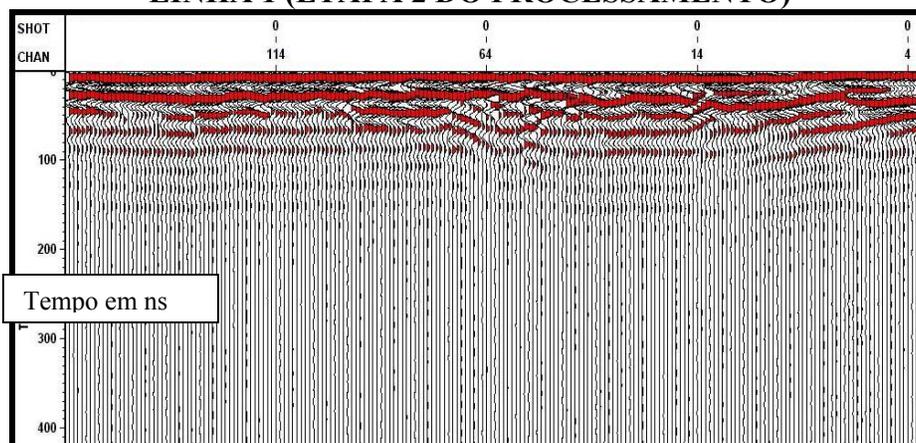
### LINHA 1 (SEM PROCESSAMENTO)



### LINHA 1 (ETAPA 1 DO PROCESSAMENTO)

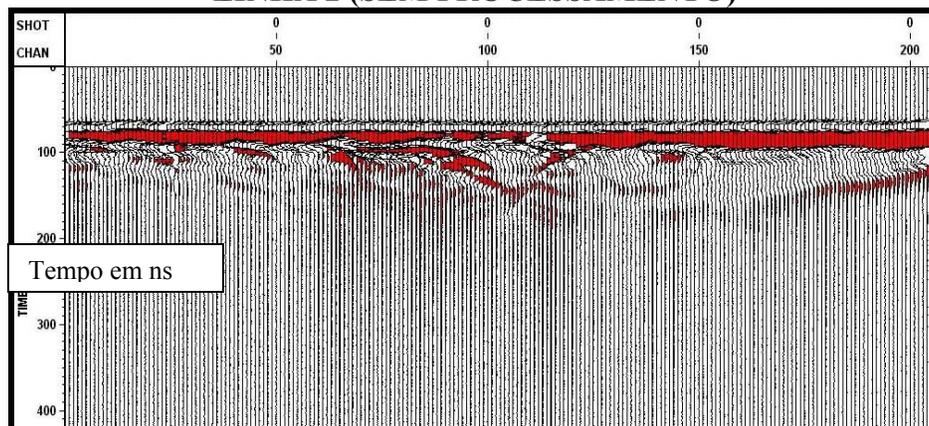


### LINHA 1 (ETAPA 2 DO PROCESSAMENTO)

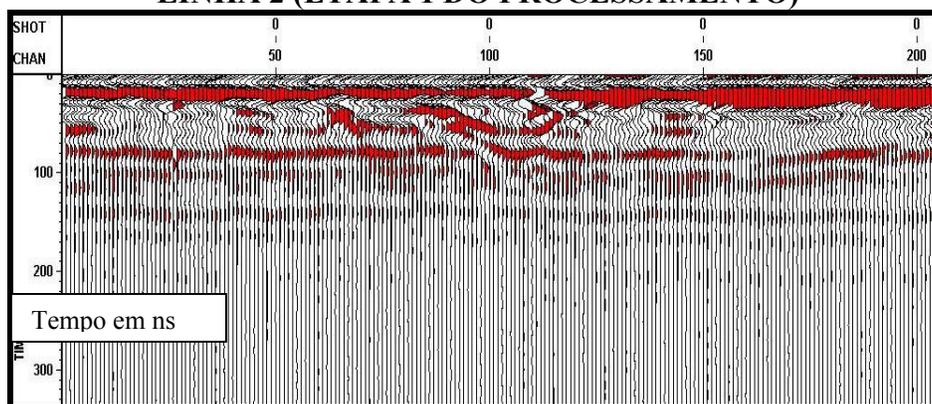


**Figura 32:** Na linha 1 podemos observar que a primeira etapa do processamento somente realçou as estruturas mais marcantes não possibilitando uma maior visualização das camadas. Uma interface mais profunda é marcada possivelmente por um nível freático ou uma espessa camada de argila. Esta interface está indicada com uma seta no radargrama correspondente a etapa 1 do processamento. Já com a segunda etapa de processamento as interfaces tornam-se mais nítidas e contínuas.

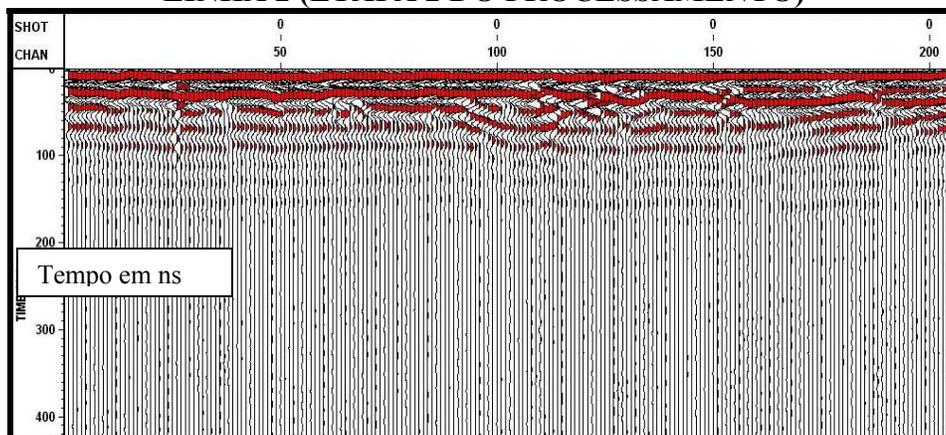
### LINHA 2 (SEM PROCESSAMENTO)



### LINHA 2 (ETAPA 1 DO PROCESSAMENTO)

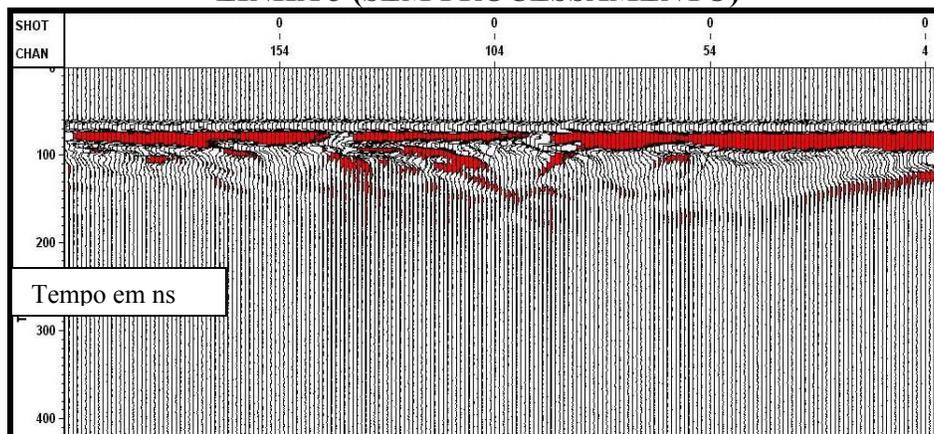


### LINHA 2 (ETAPA 2 DO PROCESSAMENTO)

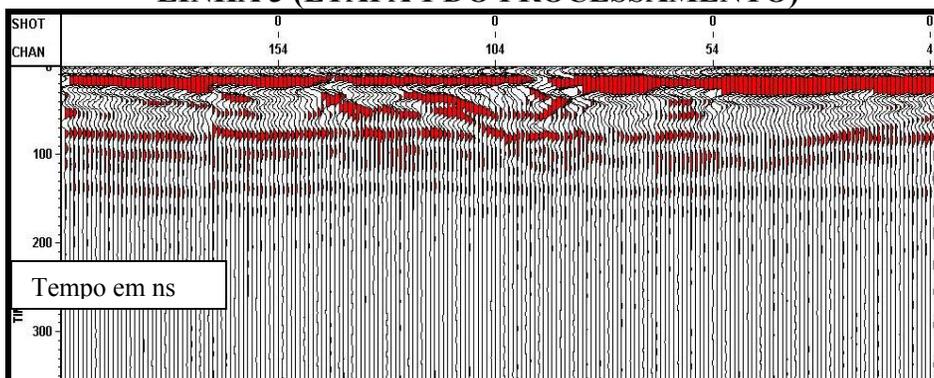


**Figura 33:** Assim como na anterior, na linha 2, tivemos com a primeira etapa de processamento um realce das principais estruturas e com a segunda etapa uma melhor visualização das interfaces. Nota-se que quase não há variação em relação à linha 1.

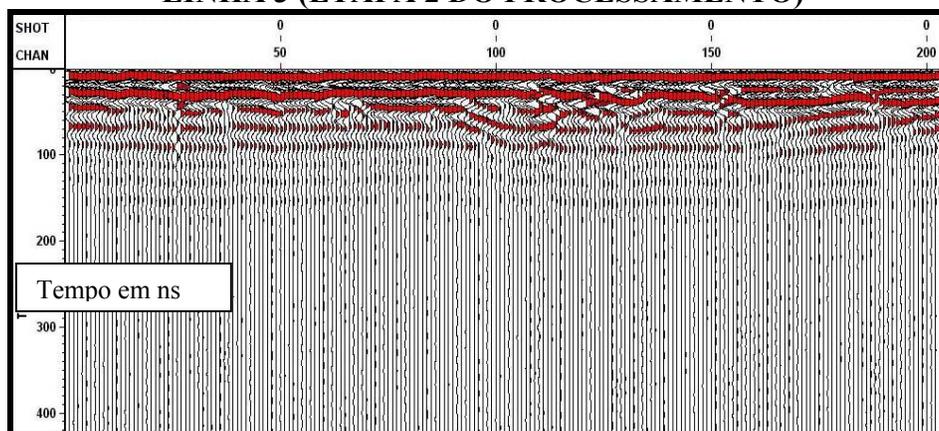
### LINHA 3 (SEM PROCESSAMENTO)



### LINHA 3 (ETAPA 1 DO PROCESSAMENTO)

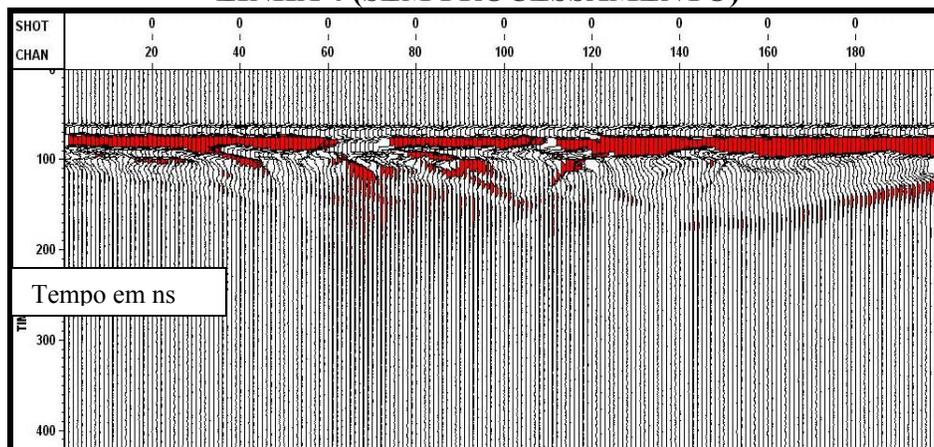


### LINHA 3 (ETAPA 2 DO PROCESSAMENTO)

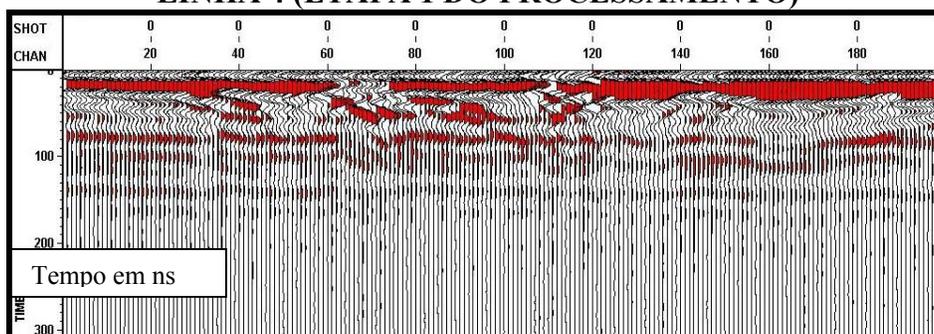


**Figura 34:** A linha 3 assim como as linhas anteriores, apresentam com a primeira etapa do processamento um realce das estruturas principais e uma interface contínua mais profunda. Com a aplicação da segunda etapa as estruturas e camadas tornaram-se mais nítidas e se manteve o mesmo padrão das linhas 1 e 2.

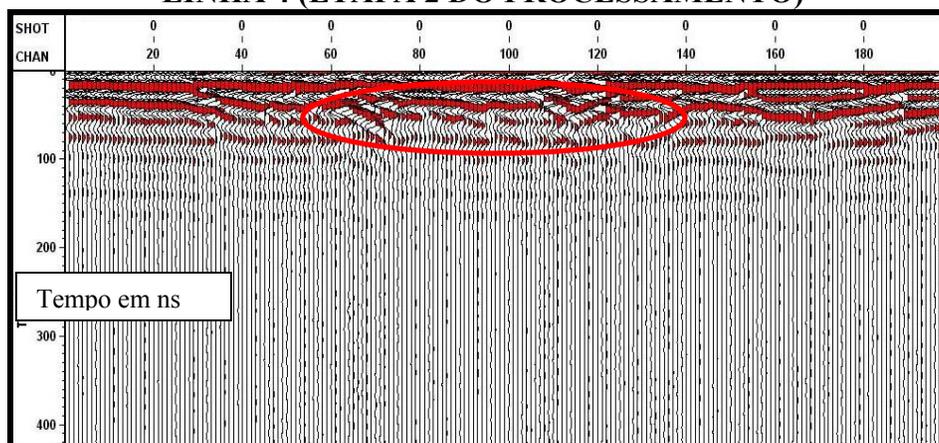
### LINHA 4 (SEM PROCESSAMENTO)



### LINHA 4 (ETAPA 1 DO PROCESSAMENTO)

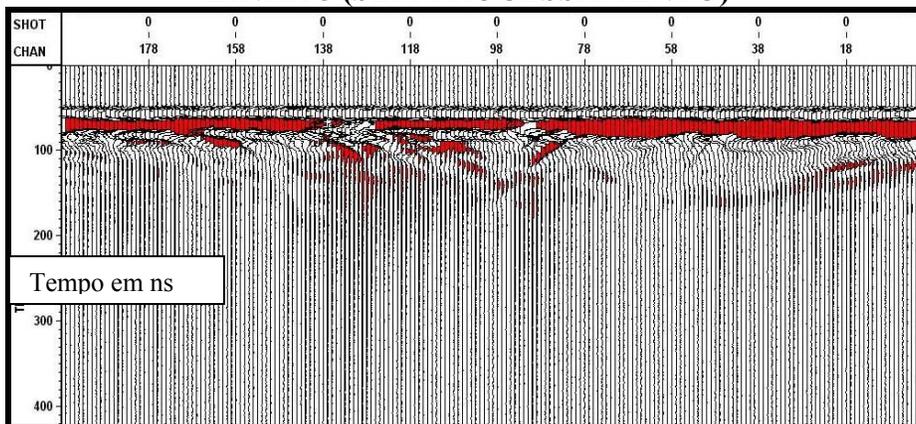


### LINHA 4 (ETAPA 2 DO PROCESSAMENTO)

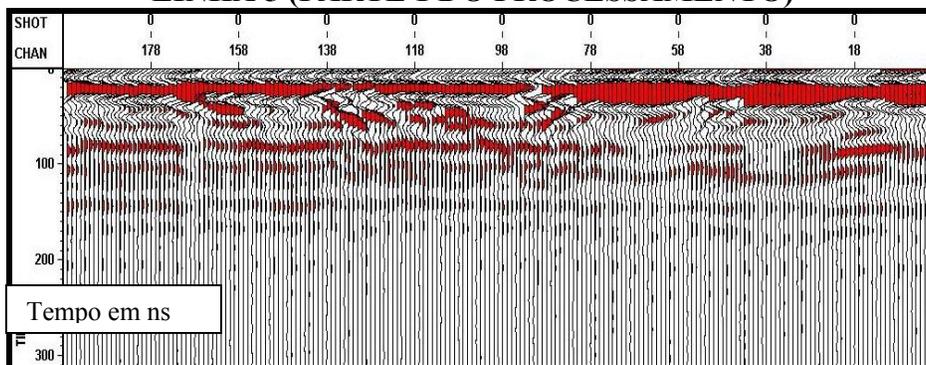


**Figura 35:** Na linha 4 podemos observar que com a aplicação da primeira etapa do processamento não houve muita diferença das linhas anteriores, porém com a aplicação da segunda etapa, a feição de “hemi-grabem” aparece mais aberta que nas linhas anteriores. Esta feição está indicada no radargrama correspondente a etapa 2 do processamento.

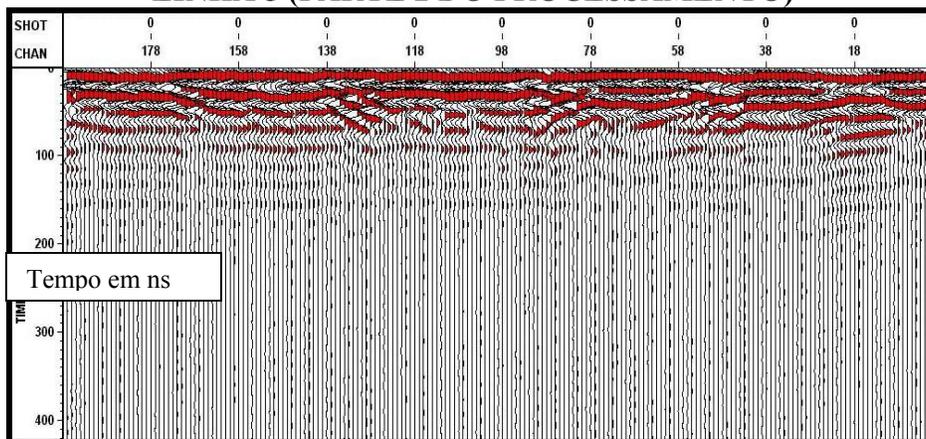
### LINHA 5 (SEM PROCESSAMENTO)



### LINHA 5 (PARTE 1 DO PROCESSAMENTO)

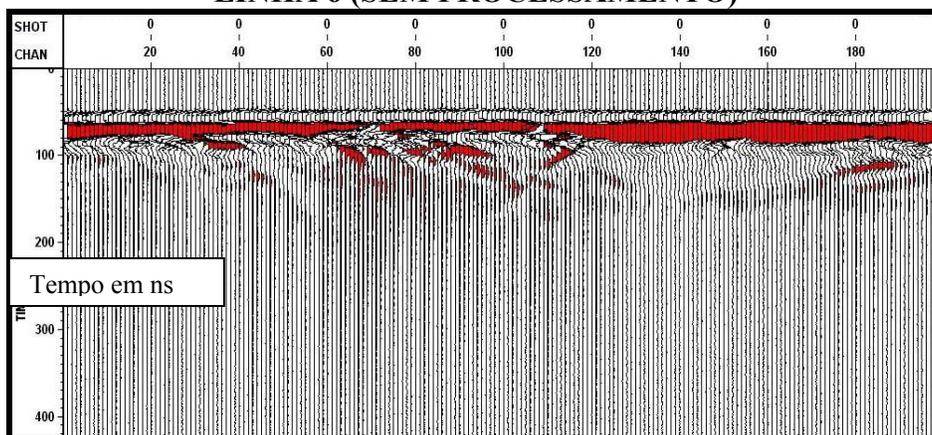


### LINHA 5 (PARTE 2 DO PROCESSAMENTO)

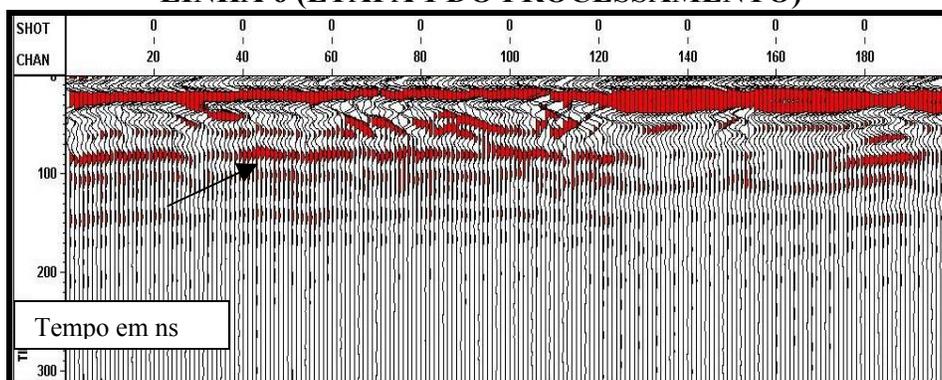


**Figura 36:** Na linha 5, observa-se uma repetição do padrão estrutural da linha 4, tanto na etapa 1 de processamento quanto na etapa 2.

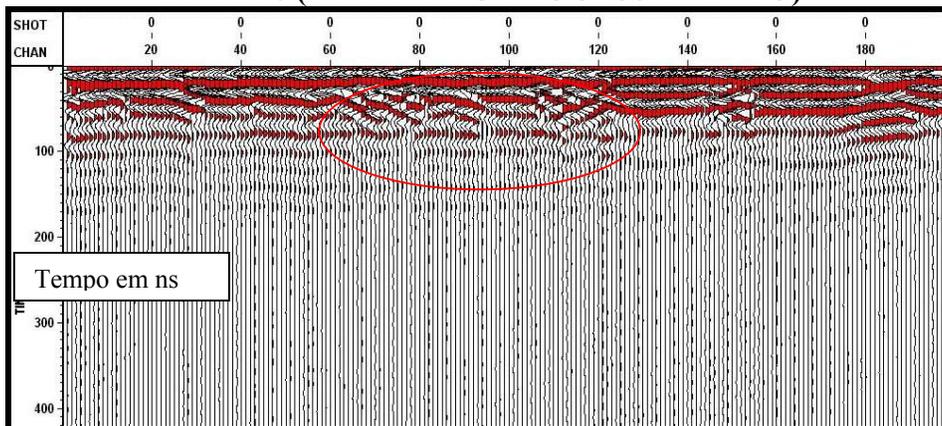
### LINHA 6 (SEM PROCESSAMENTO)



### LINHA 6 (ETAPA 1 DO PROCESSAMENTO)

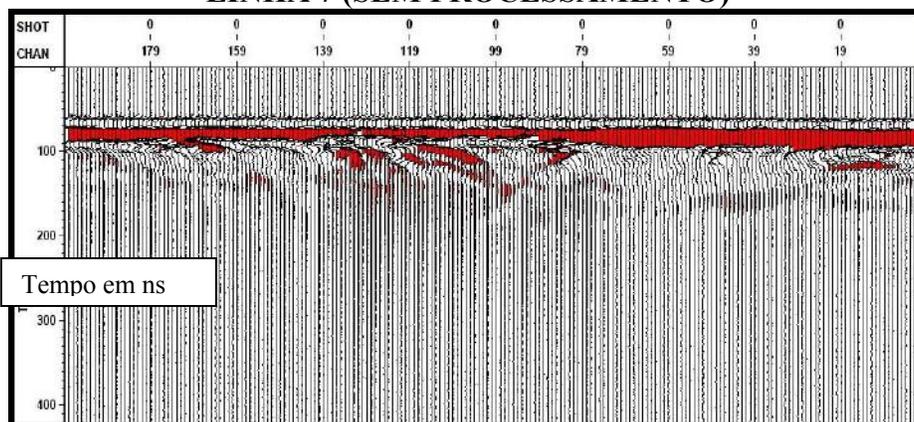


### LINHA 6 (ETAPA 2 DO PROCESSAMENTO)

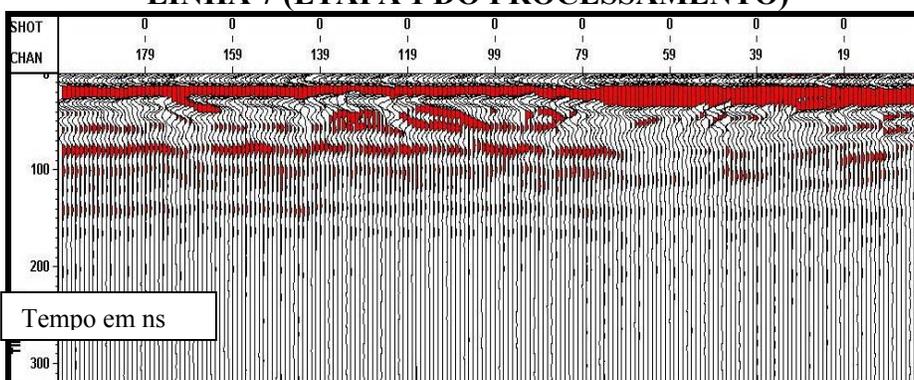


**Figura 37:** Nessa linha 6, tanto no processamento inicial como no final, observam-se novamente feições estruturais mais nítidas ao centro da linha (marcadas com um círculo), realçando as feições vistas anteriormente na linha 5.

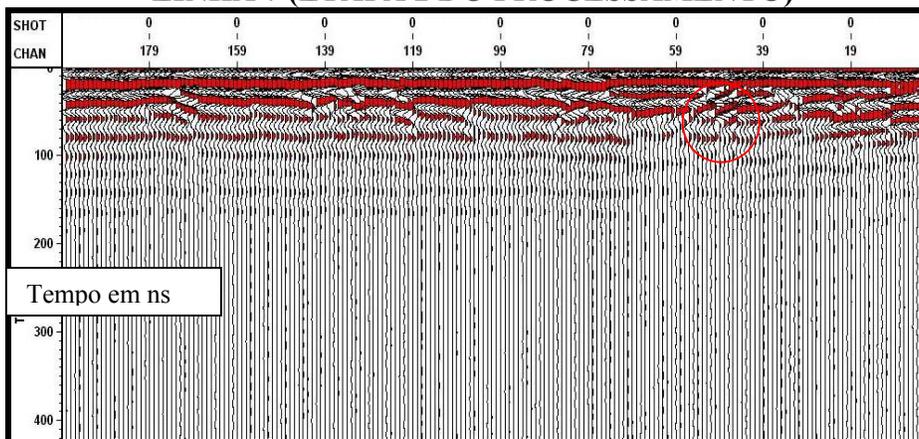
### LINHA 7 (SEM PROCESSAMENTO)



### LINHA 7 (ETAPA 1 DO PROCESSAMENTO)

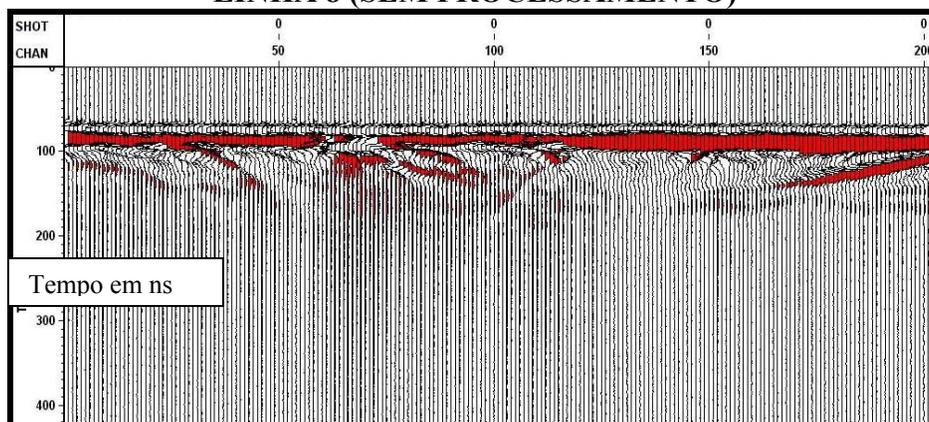


### LINHA 7 (ETAPA 2 DO PROCESSAMENTO)

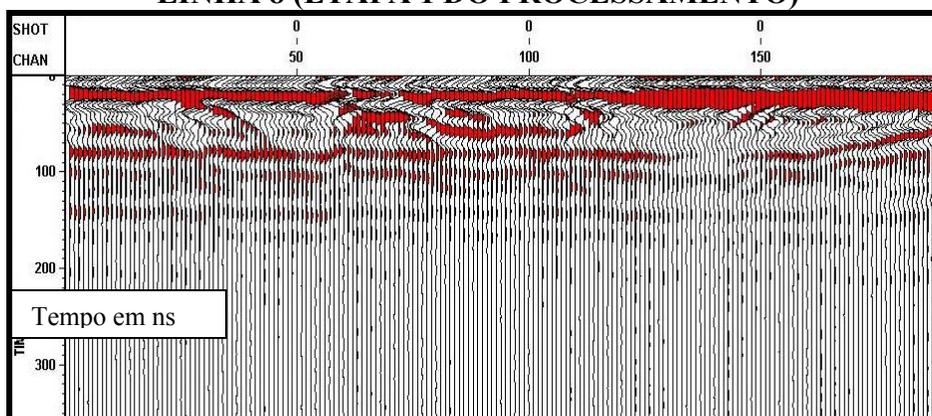


**Figura 38:** Na linha 7, aparecem como resultado das etapas 1 e 2 de processamento uma feição de falhamento mais à direita (marcada com um círculo), tal feição não estava bem visível anteriormente ou não existia nas outras linhas.

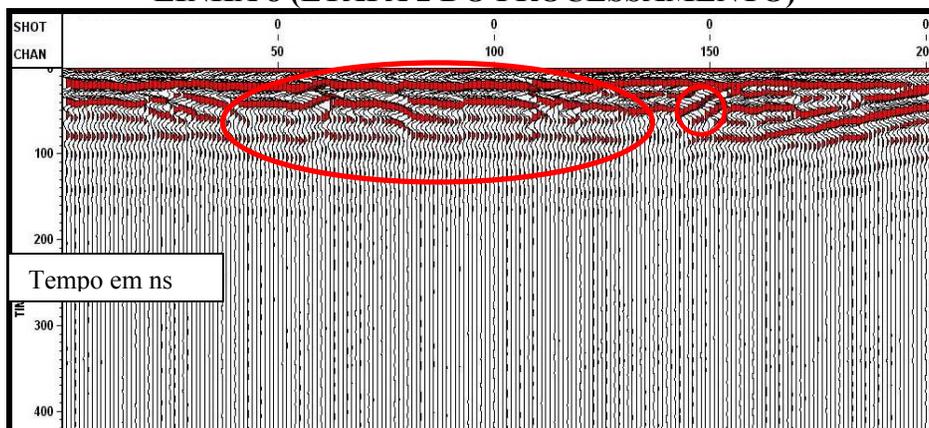
### LINHA 8 (SEM PROCESSAMENTO)



### LINHA 8 (ETAPA 1 DO PROCESSAMENTO)

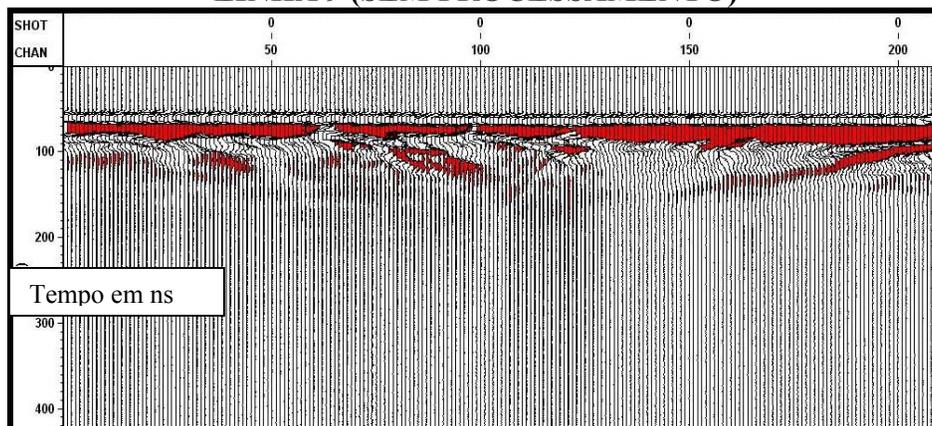


### LINHA 8 (ETAPA 2 DO PROCESSAMENTO)

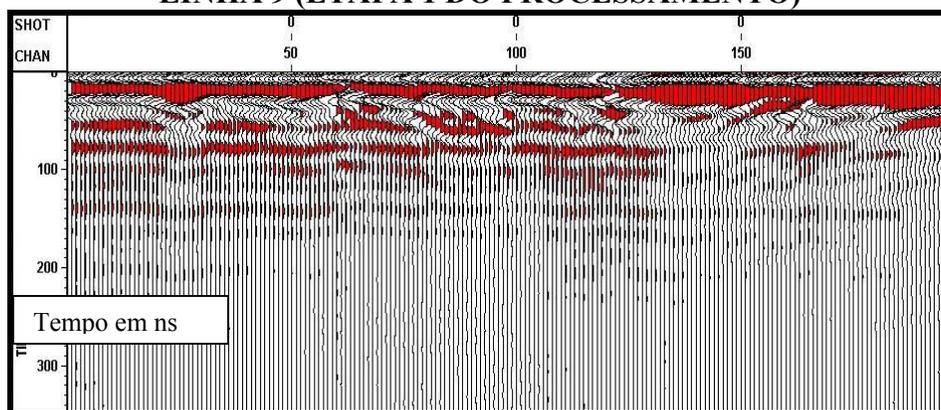


**Figura 39:** Na linha 8, os padrões estruturais descritos nas linhas 6 e 7 são mais fortes e contínuos com a segunda etapa de processamento, conforme indicado na figura.

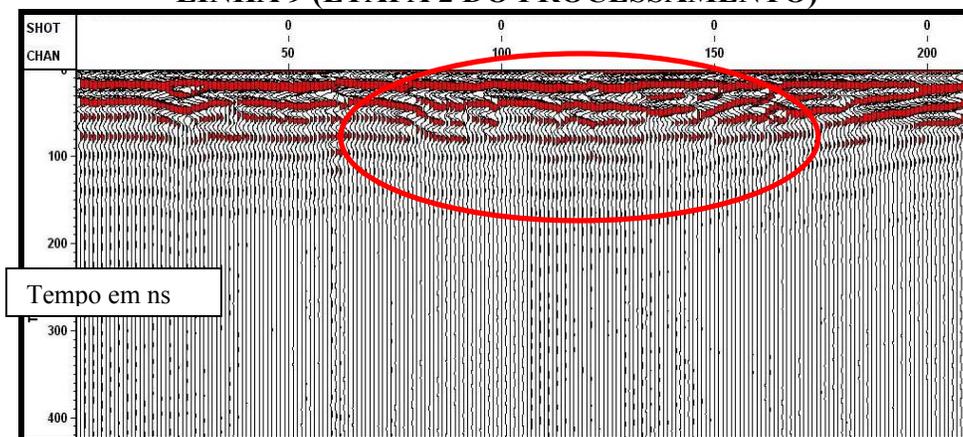
### LINHA 9 (SEM PROCESSAMENTO)



### LINHA 9 (ETAPA 1 DO PROCESSAMENTO)

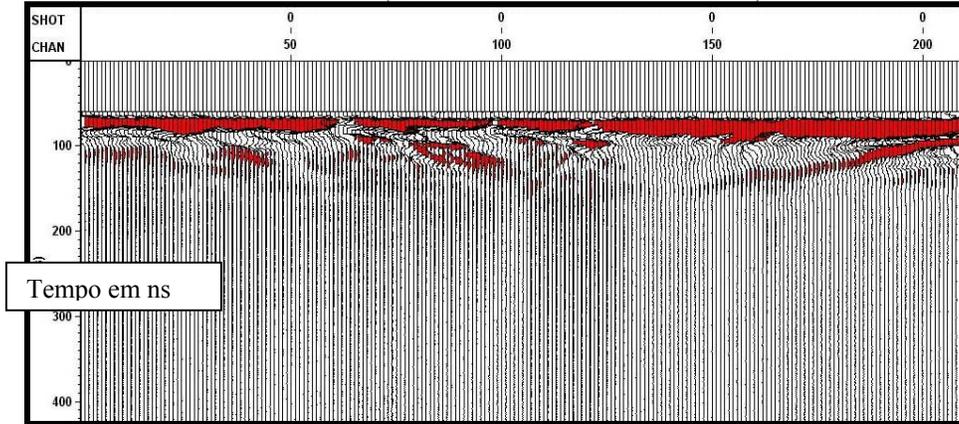


### LINHA 9 (ETAPA 2 DO PROCESSAMENTO)

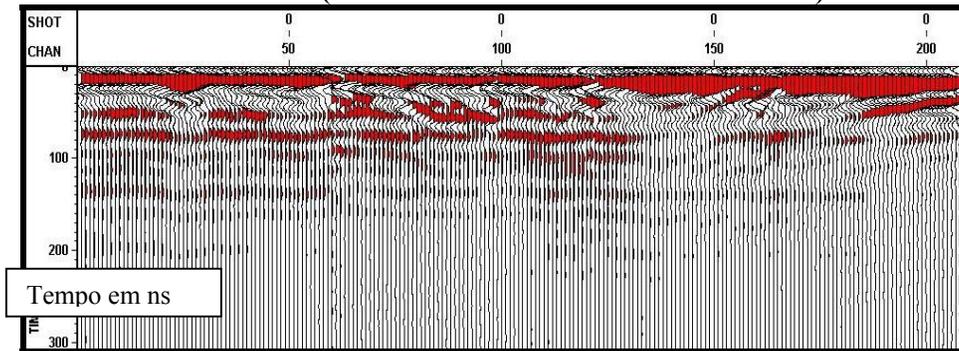


**Figura 40:** Na linha 9, após as duas etapas de processamento, é visível que as feições estruturais anteriores visíveis nas linhas 1, 2 e 3 vêm a parecer mais abertas, conforme indicado na figura.

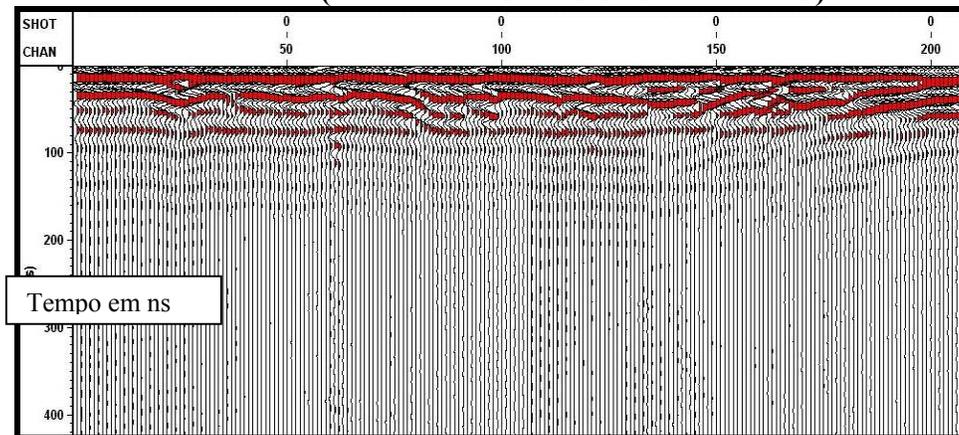
### LINHA 10 (SEM PROCESSAMENTO)



### LINHA 10 (ETAPA 1 DO PROCESSAMENTO)



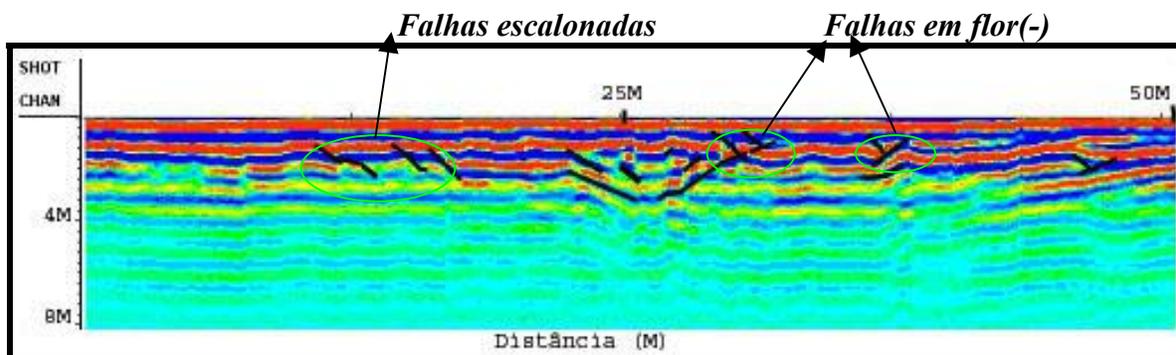
### LINHA 10 (ETAPA 2 DO PROCESSAMENTO)



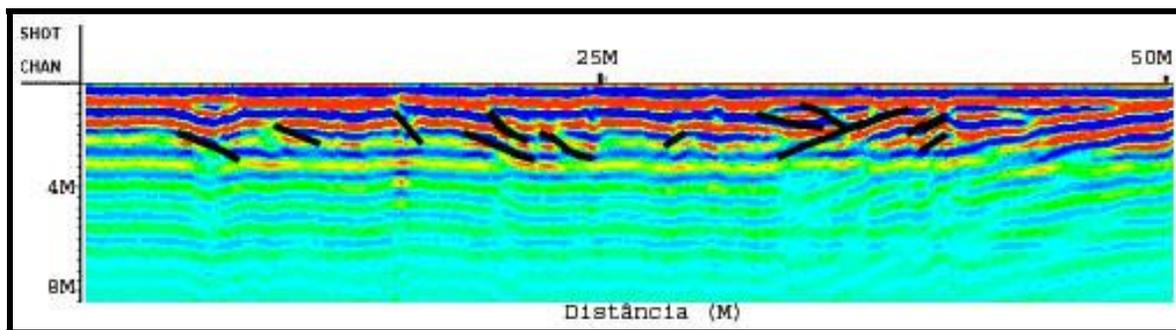
**Figura 41:** Na linha 10, são observados os mesmos padrões estruturais descritos nas linhas 8 e 9.

### 3.4 – Interpretações

Nesse item, visando uma maior compreensão das estruturas presentes no afloramento Rádio Agulhas Negras e a identificação de uma possível variação espacial dessas estruturas, foram analisadas e interpretadas as linhas 1 e 9. Essas são apresentadas com o eixo vertical convertido para profundidade (m) visto que antes foram apresentadas em tempo. Também serão visualizadas com amplitudes em escala de cores: vermelhas para amplitudes positivas e tons de azul para negativas.



**Figura 42 (Linha 1):** Nessa linha 1, é apresentado o radargrama com amplitudes em escala de cores. Nota-se uma similaridade com a seção geológica descrita por Ramos (2002), tanto nas falhas escalonadas à esquerda quanto nos padrões estruturais à direita com possíveis falhas em flor negativas.



**Figura 43 (Linha 9):** Na linha 9, o radargrama apresentado também está com amplitudes em escala de cores, porém não se observam mais nas mesmas posições as estruturas características do afloramento Rádio Agulhas Negras.

## Capítulo IV – Conclusões

Neste trabalho pode-se enumerar as seguintes conclusões:

- 1) São visíveis refletores bem definidos para as rochas sedimentares terciárias e quaternárias do afloramento Rádio Agulhas Negras.
- 2) Foi possível reconhecer as falhas e fraturas pela projeção de um segmento linear, unindo o deslocamento dos refletores o que normalmente acontece em todas as linhas. Isso ocorre devido à falta de contraste nos materiais no que diz respeito as suas características elétricas, não produzindo um refletor único e contínuo de um plano de falha.
- 3) A reflexão associada à falha, quando o plano de falha estava associado a litologias distintas (o que era visível no canto SE do afloramento onde existia o contato de sedimentos com o embasamento ocorria) gerava um refletor único no plano de falha.
- 4) Nas linhas de radargrama, com a primeira etapa do processamento, foi identificado um refletor único quase que totalmente contínuo em uma maior profundidade, esse refletor pode ser indicativo de um nível freático ou de uma espessa camada de argila, fato que esse estudo não se objetivou em constatar.
- 5) As sucessões de sedimentos arenosos e sedimentos argilosos, característicos da bacia de Resende, ficaram nítidas nas seções de radar apresentadas assim como os padrões estruturais do afloramento descritos por Ramos (2002).
- 6) Com o avanço das linhas de GPR para dentro do afloramento (sucessão das linhas), foi constatado que essas feições estruturais se tornaram mais abertas, variando muito, isso se consideramos que o avanço das 10 linhas não ultrapassou 5 (cinco) metros para dentro do terreno. Isto pode indicar uma mudança espacial no padrão estrutural local.

### **Anexo 3:** Modelagem de GPR 2D de Dias et al.

- Figura 1 – Modelo geolétrico obtido a partir da seção geológico feita por Ramos (2002) e da foto mosaico do afloramento Rádio Agulhas Negras.
- Figura 2 – Relação dos parâmetros constitutivos.
- Figura 3 – Caso estudado para análise das interfaces em 2D.
- Figura 4 – Perfil dos campos elétrico e magnético com antena de 100 MHz.
- Figura 5 – Hipérboles que possibilitaram o cálculo de velocidades.
- Figura 6 – Gráfico de velocidade intervalar e de velocidade rms para o modelo o modelo de sete camadas obtido a partir do modelo geolétrico.
- Tabela 1 – Relação entre alguns parâmetros constitutivos e o meio.
- Tabela 2 – Parâmetros físicos para o afloramento estudado.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almeida, F.F.M. (1967), Origem e evolução da Plataforma Brasileira. Bol. Div. Geol. Mineral, DNPM, Rio de Janeiro, 241; 36p.
- Almeida, F.F.M. (1976), The System of continental rifts bordering the Santos Basin, Brazil. An Acad. Bras. Ciênc., 48 (suplemento): 15-26.
- Amador, E.S. (1975), Estratigrafia e sedimentação da Bacia de Resende – RJ In: *Anais Acad. Bras. Ci.*, 47(suplemento): 181 – 223.
- Amador, E.S.; Antunes, R.L e Paixão, R.A. (1978), Notas complementares sobre a estratigrafia dos depósitos cenozóicos da Bacia de Resende. *Anais da academia. Bras. Ciênc.*, 50 (1): 122-123.
- Annan, P. (1992), *Ground Penetrating Radar. Workshop notes.* Sensors and Software, Canada. 80p.
- Cezar, G. Da S. (2001), Aplicação do radar de penetração no Solo (GPR) em sítios arqueológicos Localizados em Araruama, RJ. 136p.
- Conyers, L.B. & D. Goodman, (1997) *Ground Penetrating Radar: An Introduction for Archaeologists.* Alta Mira Press. Walnut Creek, CA.
- Da Costa, M. T. (2002), Re-Processamento de dados geofísicos de GPR (Radar de Penetração no Solo) visando obter maior resolução do radargrama, 53 p.
- Davis, J.L. & Annan, A.P. (1989), Ground Penetrating Radar for High-Resolution Mapping of Soil and Rock Stratigraphy. *Geophysical Prospecting*, 37: 531-551.
- Dias, G.A.N.; Gallotti, M.; Rocha, P.F. e Da Silva, J.C. (2003), Estudo de análogos de reservatório na Bacia de Resende (Brazil) com dados de GPR e modelagem FDTD. Sociedade Brasileira de Geofísica (SBGF).
- Giannopoulos, A. (1997). GPRMAX2d. User's Manual. Version 1.5.
- Hasui, y; Gimenez, A.F; Melo, M.S. (1982) Sobre as bacias tafrogênicas continentais do sudeste brasileiro. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 30, Recife. Anais Recife, SBG, V.1, p. 382-391.
- Herman, H. (1997), *Robotic Subsurface Mapping Using Ground Penetrating Radar.* PhD Thesis. The Robotics Institute. Carnegie Mellon University. EUA.
- Madeira, C. V. (2002), Estratigrafia e Arquitetura de Depósitos Sedimentares Terciários e Quaternários no Médio Vale do Rio Paraíba do Sul (Sudeste do Brasil), com base em Reflexão de Ondas de Radar, 256 p.

- Melo, M.S.; Riccomini, C.; Campanha, G. A. C.; Mioto, J. A.; Almeida, F.F.M.; Hasui, Y.; Ponçano, W. L.; And Gimenez, A. F. (1983), Estudos geológico-tectônicos na Bacia de Resende (RJ) e sedimentos Terciários da área de Volta Redonda (RJ) e bacia de Taubaté (área de Cruzeiro, SP). *Rel. IPT 17 737*; IPT/DMGA, São Paulo, 2 vols.
- Melo, M.S.; Riccomini, C.; Almeida, F.F.M.; Hasui, Y. (1985), Sedimentação e tectônica da Bacia de Resende, RJ. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 57: 467-479.
- Mitchell, J.K. (1993), *Fundamentals of Soil Behavior*. 2 ed. EUA. John Willey & Sons, 437 p.
- Parasnis, D.S. (1997), *Principles of Applied Geophysics*. 5 ed. Londres, Chapman & Hall, 437 p.
- Porsani J. L. 2002. Método GPR, Aplicações em geologia, geotécnica, meio ambiente e planejamento urbano. IV Escola de Verão de Geofísica. Versão 3.0 Universidade de São Paulo.GPR.
- Ramos, R. (2002), *Sistemas Aluviais Terciários da Bacia de Resende/RJ. Análise de Fácies e Revisão estratigráfica*.
- Riccomini; C. (1987), Evolução geológica das bacias de Taubaté, Resende e Volta Redonda, do sistema de Rifts Continentais da Serra do Mar, São Paulo (Tese de doutoramento a ser apresentada ao Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo).
- Riccomini; C. (1989), *O Rift Continental do Sudeste do Brasil*. São Paulo, 256 p. (Tese de doutoramento apresentada ao instituto de Geociências da Universidade de São Paulo).
- Smemo, C. M. (2000), *Processing and Visualization of Ground Penetrating Radar Data for Assessing Natural Hydrogeologic Conditions*. Term Paper 540, Department of Civil Engineering, Brigham Young University, 39 p.
- Telford, W.M.; Geldart, L.P. and Sheriff, R.E. (1990), *Applied Geophysics*. 2 ed. Cambridge University Press, 770 p.
- Tutorial - Vista 2D/3D Release 4.00 Seismic Image Software, 1255, 815 - 8th Avenue, SW - Calgary, Alberta CANADA, T2P 3P2
- Ulriksen, C.P.F. (1982), *Application of Impulse Radar to Civil Engineering*. PhD Dissertation Lund, University Technological Lund.
- Wänstedt, et al. (2000), Borehole Radar Measurements Aid Structure Geological Interpretations. *Journal of Applied Geophysics*, 43, 2-4: 227-237.
- Yamamoto, I. T. (1995), Palinologia das Bacias Tafrogênicas do Sudeste (Bacias de Taubaté, São Paulo e Resende): Análise Bioestratigráfica Integrada e Interpretação Paleoambiental (Dissertação de Mestrado).

Sites visitados:

<http://www.resende.rj.gov.br/>.

<http://www.georadar.com/howitwrk.htm>

<http://www.sensoft.ca/applications/index.html>

<http://www.sisimage.com/>

<http://ramac.malags.com/>

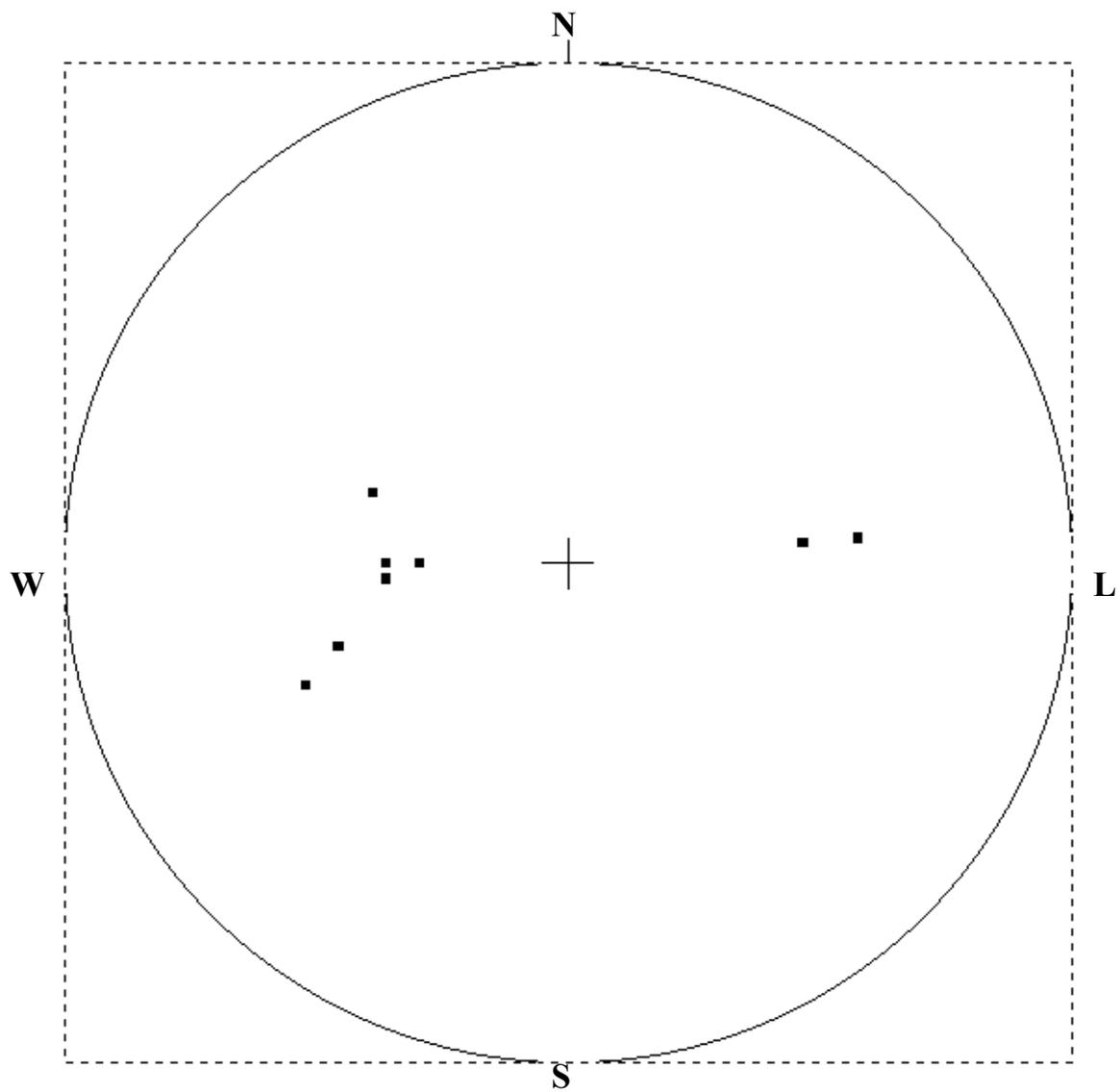
<http://maplink.com.br/>

## Anexo 1

 <p><b>Geophysical Survey Systems Inc.</b> Member Oyo Group 13 Klein Drive North Salem, NH 03073 Tel : (603) 893-1109 Fax : (603) 889-3984 <a href="mailto:sales@geophysical.com">sales@geophysical.com</a> · <a href="#">company description</a> ·</p>	 <p><b>Sensors &amp; Software, Inc.</b> 1091 Brevik Place Mississauga, ON L4W 3R7 CANADA Tel : (905) 624-8909 Fax : (905) 624-9365 <a href="mailto:cl@sensoft.ca">cl@sensoft.ca</a> · <a href="#">company description</a> ·</p>	 <p><b>MALA Geoscience</b> PO Box 80430 Charleston, SC 29416 USA Tel: (843) 852-5021 Fax:(843) 769-7397 <a href="mailto:matt.wolf@malags.se">matt.wolf@malags.se</a> · <a href="#">company description</a> ·</p>
 <p><b>Geophysical Archaeometry Laboratory</b> 20014 Gypsy Lane Woodland Hills, CA 91364 U.S.A. Tel : (818) 716-6957 <a href="mailto:gal_usa_goodman@msn.com">gal_usa_goodman@msn.com</a> · <a href="#">company description</a> ·</p>	 <p><b>IDS Ingegneria dei Sistemi SpA</b> via Livornese 1019 56010 Pisa, ITALY Tel : +39 050 3124232 Fax : +39 050 3124255 <a href="mailto:l.pennacchi@ids-spa.it">l.pennacchi@ids-spa.it</a> · <a href="#">company description</a> ·</p>	 <p><b>Parallel Geoscience Corporation</b> P.O. Box 5989 Incline Village, NV 89450 U.S.A. Tel : (760) 373-8648 Fax : (760) 373-8148 <a href="mailto:mloehrer@parallelgeo.com">mloehrer@parallelgeo.com</a> · <a href="#">company description</a> ·</p>

**Anexo 1:** As 6 (seis) maiores empresas que atuam no ramo de GPR. Entre essas a **Sensors & Software, Inc.**, cujos equipamentos foram usados para a aquisição de dados nesse trabalho. Fonte: Sites dessas mesmas empresas.

## Anexo 2



**Anexo 2:** Falhas medidas no afloramento plotadas em um estereograma.

## Anexo 3

### Modelagem GPR 2D de Dias et al. (2003)

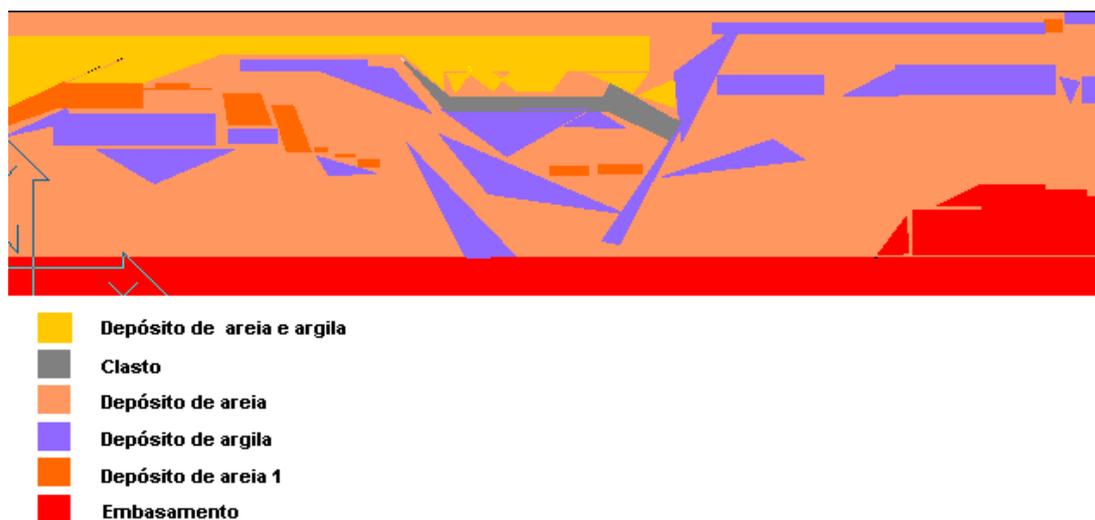
Originalmente a velocidade foi obtida através do método de modelagem numérica de Diferenças Finitas no Domínio do Tempo (FDTD). Foi utilizado o algoritmo GPRMAX2D (Giannopoulos, 1997).

O resultado desse trabalho foi a elaboração de um modelo (figura 1), baseado em estruturas geoeletricas construídas através do modelo geológico de Ramos (2002) e foto mosaico feita para esta monografia (De Araújo Jr. 2003). Através desse modelo pode-se simular o resultado de um levantamento a partir de parâmetros pré-definidos para determinada frequência. Sendo os parâmetros permissividade dielétrica e condutividade, essenciais para o cálculo da propagação da velocidade no meio geológico (Dias, et al., 2003).

Porsani (2002) in Dias et al. (2003) menciona que uma das maneiras de se obter a velocidade da onda de radar no meio, é convertendo o tempo duplo dos perfis de reflexão em profundidade, o que pode ser feito através da constante dielétrica do solo, substituindo-a na expressão de velocidade abaixo:

$$V = \frac{C}{\epsilon_r^{1/2}} \quad \text{Onde } C \text{ é a velocidade da luz no vácuo } (c=0,3m/ns) \\ \text{e } \epsilon_r \text{ é a constante dielétrica dos materiais.} \quad (7)$$

Os parâmetros utilizados para a construção do modelo compõem-se de uma malha de 250 m<sup>2</sup>, com antena de frequência de 100 MHz. O modo de propagação da onda eletromagnética considerado é o TE (E<sub>z</sub>, H<sub>x</sub>, H<sub>y</sub>), que segundo Liu et al. (2002) é sempre orientado perpendicular a direção de propagação (Dias, et al., 2003).



**Figura 1:** Modelo geoeletrico obtido a partir da seção geológica feita por Ramos (2002) e da foto mosaico do afloramento Rádio Agulhas Negras feita para essa monografia. Fonte: (Dias, et al., 2003).

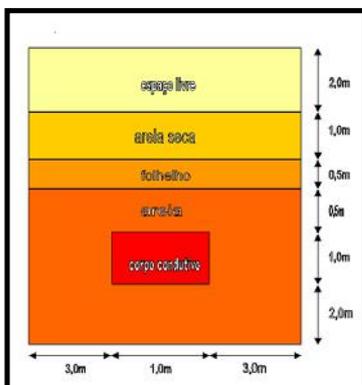
Supondo um meio linear e isotrópico, que a antena transmissora é modelada como uma linha fonte e que os parâmetros constitutivos (figura 2), na maior parte dos casos, não variam com a frequência; foram caracterizados os modelos da figura 3 e 4. Na figura 3 têm-se um modelo com um caso estudado para análise das interfaces em 2D onde a areia em cor abóbora é o corpo condutivo.

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} = \epsilon_r \epsilon_0 \vec{E}$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} = \mu_r \mu_0 \vec{H}$$

$\epsilon$	- permissividade elétrica (F/m);
$\mu$	- permeabilidade magnética (H/m);
$\epsilon_r$	- permissividade elétrica relativa;
$\mu_r$	- permeabilidade magnética relativa;
$\epsilon_0$	- permissividade elétrica no vácuo (F/m);
$\mu_0$	- permeabilidade magnética no vácuo (H/m);

**Figura 2:** Relação dos parâmetros constitutivos. Fonte: (Dias et al., 2003)



**Figura 3:** Caso estudado para análise das interfaces em 2D. Fonte: (Dias et al., 2003).

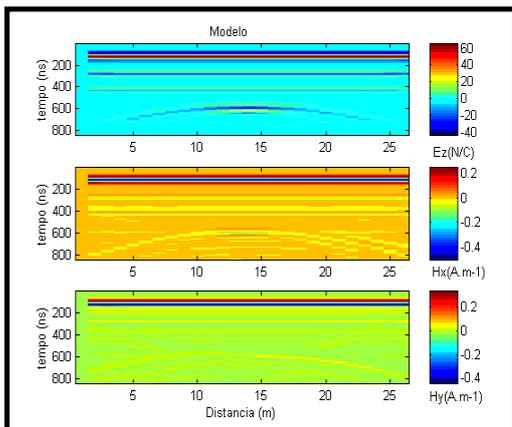
Meio	Permissividade Dielétrica (F/m)	Condutividade Elétrica (S/m)
Espaço Livre	1	0
Areia Seca	10	0.001
Folhelho	20	0.01
Areia	10	0.001
Corpo Condutivo	30	10

**Tabela 1:** Relação entre alguns parâmetros constitutivos e o meio. Fonte: (Dias et al., 2003).

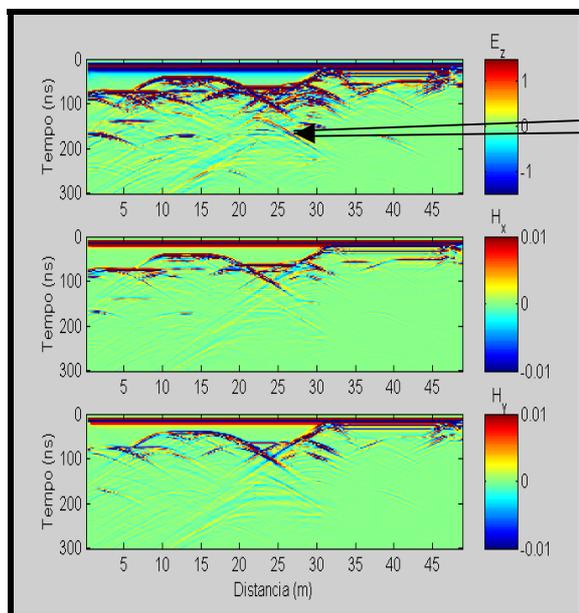
Depois, baseado nesse modelo de interfaces em 2D foi elaborado um outro modelo para o afloramento estudado com parâmetros físicos, o que pode ser visto na figura 4 e 5, e discriminado na tabela a seguir:

MEIO	PERMISSIVIDADE ELÉTRICA (F/m)	CONDUTIVIDADE ELÉTRICA (S/m)
Embasamento	7,0	1
Depósito de Areia e Argila	5,0	0,01
Depósito de Areia 1	20,0	0,1
Depósito de Areia	4,0	0,01
Depósito de Argila	15,0	285,15
Clasto	10,0	0,01

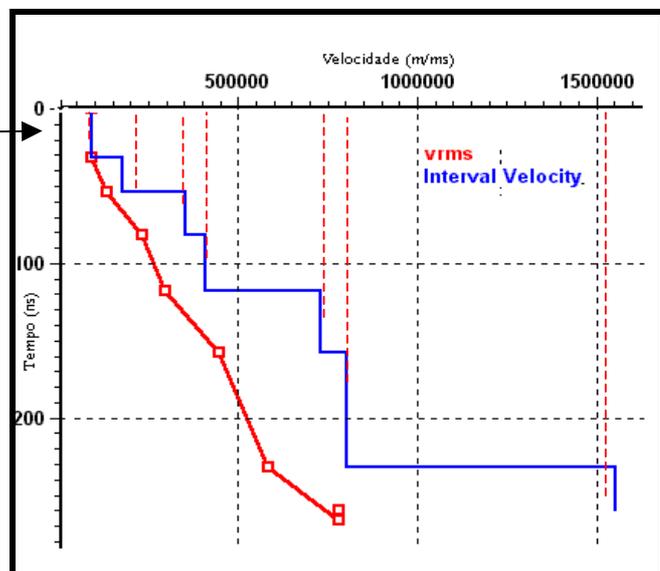
**Tabela 2:** Parâmetros físicos para o afloramento estudado. Fonte: (Dias et al., 2003).



**Figura 4:** Perfil dos campos elétrico e magnético com antena de 100 MHz. Fonte: (Dias et al., 2003).



**Figura 5:** Hipérboles que possibilitaram o cálculo de velocidades. Fonte: (Dias, et al; 2003).



**Figura 6:** Gráfico de velocidade intervalar e de velocidade rms para o modelo o modelo de sete camadas obtido a partir do modelo geológico. Fonte: (Dias, et al., 2003).

Os principais resultados obtidos por Dias et al. (2003) para o cálculo de velocidades podem ser resumidos abaixo:

No modelo geológico sete camadas foram individualizadas e destas foram estimadas velocidades rms e velocidades intervalares. Estas estão inseridas nos intervalos de tempo (0-100ns, 100-200ns, >200ns) m/ms como pode ser visto na figura 6.

No intervalo (0-100ns) foram obtidas as **4 (quatro)** seguintes velocidades intervalares: **80.000, 175.000, 350.000, 400.000 m/ms**.

No intervalo (100-200ns) foram obtidas as **2 (duas)** seguintes velocidades intervalares: **725.000 e 800.000 m/ms**.

No intervalo (> 200.000ns) foi obtida a velocidade intervalar de **1.500.000 m/ms**.