



**COPPE/UFRJ**

**MODELAGEM E MIGRAÇÃO ZERO OFF-SET 2D PARA CÁLCULO DE VOLUMES DE  
DRAGAGEM E DERROCAGEM**

Ana Carolina Guimarães Ferreira

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientadores: Webe João Mansur  
André Bulcão

Rio de Janeiro  
Outubro de 2009

# **Livros Grátis**

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

Milhares de livros grátis para download.

MODELAGEM E MIGRAÇÃO ZERO OFF-SET 2D PARA CÁLCULO DE VOLUMES DE  
DRAGAGEM E DERROCAGEM

Ana Carolina Guimarães Ferreira

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ  
COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS  
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM  
ENGENHARIA CIVIL.

Aprovada por:

---

Prof. Webe João Mansur, Ph.D.

---

Dr. André Bulcão, D.Sc.

---

Prof. Marco Aurélio Chaves Ferro, D.Sc.

---

Prof. José Antônio Fontes Santiago, D. Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

OUTUBRO DE 2009

Ferreira, Ana Carolina Guimarães

Modelagem e migração zero off-set 2D para cálculo de volumes de dragagem e derrocagem / Ana Carolina Guimarães Ferreira. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2009.

XII, 45 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Webe João Mansur e André Bulcão.

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Civil, 2009.

Referências Bibliográficas: p. 43-45.

1. Sísmica de subsuperfície 2. Modelagem numérica e Migração Raio Vertical e Phase Shift. 3. Dragagem e derrocagem. I. Mansur, Webe João, *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Civil. III. Título.

*“A originalidade é impossível. No máximo, podemos variar muito ligeiramente o passado, dar-lhe um novo matiz, uma nova entonação. Cada geração escreve o mesmo poema, conta o mesmo conto. Com uma pequena diferença: a voz.”*

*(Jorge Luís Borges)*

## DEDICATÓRIA

“Ao desenvolvimento tecnológico da engenharia civil,  
patamar do crescimento humano.”

## **AGRADECIMENTOS**

- A CNPq pela bolsa, o que me permitiu uma dedicação mais profunda;
- A Petrobrás, que por meio do Dr. André Bulcão forneceu as ferramentas necessárias ao desenvolvimento do trabalho;
- Aos meus pais, pela participação ativa e investimentos acadêmicos;
- À minha família e amigos, pelo apoio essencial.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

MODELAGEM E MIGRAÇÃO ZERO OFF-SET 2D PARA CÁLCULO DE VOLUMES DE  
DRAGAGEM E DERROCAGEM

Ana Carolina Guimarães Ferreira

Outubro/2009

Orientadores: Webe João Mansur

André Bulcão

Programa: Engenharia Civil

Em regiões marinhas onde existe dificuldade na realização de sondagens para a obtenção do perfil do terreno ou onde o número de sondagens a serem realizadas torna proibitivo o uso dos métodos tradicionais, a caracterização do solo pode ser feita através de métodos avançados de geofísica de subsuperfície, tais como a sísmica rasa.

Estas técnicas permitem obter o traçado do terreno através da aquisição de imagens de alta resolução em três dimensões, resultantes da interpretação dos dados coletados até dezenas de metros de profundidade. Desta forma, obtém-se grande precisão e qualidade nos dados, reduzindo o erro na execução de fundações e obras de terra.

O trabalho apresentado mostra como aplicar a geofísica rasa em problemas típicos de fundações na engenharia civil, particularmente em regiões submersas, onde se deseje obter o volume de solo e rocha a ser removido como ocorre em obras portuárias para permitir a atracação de navios de maior calado. Foi utilizada a equação da acústica para simular a propagação de ondas no mar e em subsuperfície. A migração baseou-se na teoria de Raios Verticais e no processo conhecido em geofísica como Phase-Shift.



Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

ZERO OFF-SET 2D MODELING AND MIGRATION TO COMPUTE DRAGING AND ROCK  
REMOVAL VOLUMES

Ana Carolina Guimarães Ferreira

October/2009

Advisors: Webe João Mansur  
André Bulcão

Department: Civil Engineering

In marine regions where difficulty in accomplishment of sounding for obtainment the earth profile or were the quantity/number of soundings to be conducted makes prohibitive the use of traditional methods, the characterization of the ground/soil can be made using advanced methods of sub-surface geophysics, such as sub-surface seismic.

These techniques allow the land mapping by obtaining high resolution images in three dimensions, through interpretation of data collected up to dozens of meters deep. Thus, it is possible to obtain high accuracy and quality data, reducing execution errors of foundations and land/earth works.

The presented work shows how to apply sub-surface geophysics in typical problems of civil engineering foundations. The particular application considered here concerns submerged regions, when it is necessary to obtain information about the volume of soil and rock to be removed, as happens in port building work to allow the berthing of greater draughts ships. The acoustic wave equation was used to simulate the waves propagation in the sea and subsurface. The migration was based on Vertical Ray theory and on the process known as Phase-Shift.

## ÍNDICE

<b>CAPÍTULO 1</b>	<b>1</b>
<b>1 INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
<b>1.1. ASPECTOS GERAIS</b>	<b>1</b>
<b>1.2. METODOLOGIA E OBJETIVOS</b>	<b>3</b>
<b>1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO</b>	<b>3</b>
<b>CAPÍTULO 2</b>	<b>5</b>
<b>2 AQUISIÇÃO SÍSMICA</b>	<b>5</b>
<b>2.1. INTRODUÇÃO</b>	<b>5</b>
<b>2.2. PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DA AQUISIÇÃO SÍSMICA</b>	<b>9</b>
<b>2.3. PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DA SÍSMICA DE SUBSUPERFÍCIE COM <i>OFFSET</i> NULO</b>	<b>11</b>
<b>CAPÍTULO 3</b>	<b>13</b>
<b>3 MODELAGEM NUMÉRICA</b>	<b>13</b>
<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>13</b>
<b>APRESENTAÇÃO DO TERMO FONTE DA EQUAÇÃO DA ONDA</b>	<b>14</b>
<b>CRITÉRIO DE DISPERSÃO NUMÉRICA E ESTABILIDADE</b>	<b>17</b>
<b>MODELAGEM NUMÉRICA UTILIZANDO DIFERENÇAS FINITAS</b>	<b>19</b>

<b>MODELOS DE VELOCIDADE</b>	<b>21</b>
<b>SISMOGRAMAS GERADOS</b>	<b>25</b>
<b>CAPÍTULO 4</b>	<b>28</b>
<b>4 MIGRAÇÃO SÍSMICA</b>	<b>28</b>
<b>4.1. INTRODUÇÃO</b>	<b>28</b>
<b>4.2. MIGRAÇÃO POR RAIOS VERTICAIS</b>	<b>29</b>
<b>4.3. MÉTODO PHASE-SHIFT</b>	<b>32</b>
<b>A. RESULTADO MIGRAÇÃO PELO MÉTODO PHASE-SHIFT</b>	<b>35</b>
<b>CAPÍTULO 5</b>	<b>39</b>
<b>5 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS</b>	<b>39</b>
<b>CAPÍTULO 6</b>	<b>41</b>
<b>6 CONCLUSÕES</b>	<b>41</b>
<b>6.1. RESULTADOS APRESENTADOS</b>	<b>41</b>
<b>6.2. TRABALHOS FUTUROS</b>	<b>42</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>43</b>

## LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 2. 1 – Transmissão e recepção do sinal sísmico de acordo com a variação da impedância acústica das camadas.</i> .....	10
<i>Figura 3. 1 – Características de um equipamento típico (3200-XS sub-bottom profiling system – Tektronix – Edgetech Marine) para aquisição em baixas profundidades.</i> .....	15
<i>Figura 3.2 – a) Fonte FM modelada por uma Gaussiana; b) Espectro de frequência da fonte FM em Hz</i> .....	16
<i>Figura 3.3 – a) Fonte gaussiana; b) Espectro de frequência da fonte gaussiana em Hz; ...</i>	17
<i>Figura 3.4 – Modelos de velocidade utilizados: a) Seção A; b) Seção B; c) Seção C; d) Seção D; e) Seção E; f) Seção F.</i> .....	24
<i>Figura 3.5 – Sismogramas gerados: a) Sismograma Seção A; b) Sismograma Seção B; c) Sismograma Seção C.</i> .....	25
<i>Figura 3.6 – Sismogramas gerados: a) Sismograma Seção D; b) Sismograma Seção E; c) Sismograma Seção F.</i> .....	26
<i>Figura 4. 1 – Seção obtida por migração por raio vertical: Seção A.</i> .....	29
<i>Figura 4. 2– Seções obtidas por migração por raio vertical: a) Seção B, b) Seção C, c) Seção D, d) Seção E.</i> .....	30
<i>Figura 4. 3– Seção obtida por migração por raio vertical: a) Seção F.</i> .....	31
<i>Figura 4. 4– Seções obtidas por migração Phase-Shift a) Seção A; b) Seção B.</i> .....	35
<i>Figura 4. 5– Seções obtidas por migração Phase-Shift a) Seção C, b) Seção D, c) Seção E, d) Seção F.</i> .....	36

## LISTA DE TABELAS

<i>Tabela 2.1 – Velocidade de propagação das ondas acústicas primárias em diferentes materiais.....</i>	<i>7</i>
<i>Tabela 3.1 – Velocidade de propagação da onda acústica em diferentes meios.....</i>	<i>22</i>
<i>Tabela 3.2– Área de solo obtida nos modelos de velocidade.....</i>	<i>22</i>
<i>Tabela 4.1 – Área de solo nas seções em velocidade obtidas por migração por Raio Vertical.....</i>	<i>31</i>
<i>Tabela 4.2 – Área de solo nas seções em velocidade obtidas por migração por Phase-Shift.....</i>	<i>37</i>
<i>Tabela 5.1 – Variação da área de solo.....</i>	<i>39</i>
<i>Tabela 5.2– Variação percentual da área de solo.....</i>	<i>39</i>

# CAPÍTULO 1

---

## 1 INTRODUÇÃO

### 1.1. ASPECTOS GERAIS

A engenharia civil vem lentamente se adaptando às novas tecnologias que surgem, em função da resistência à implementação imediata de procedimentos inovadores, seja na área de construção predial seja em obras de infra-estrutura. O desenvolvimento tecnológico ora existente permite a substituição dos métodos de sondagem tradicionais por métodos geofísicos mais precisos que, se corretamente realizados, podem reduzir o tempo e o custo da prospecção do solo.

Como explicado por BUTLER, 2005 (capítulo 1), a engenharia civil é resistente aos métodos da geofísica. A necessidade de boa precisão gera uma expectativa muito exigente e qualquer imprecisão, por menor que se apresente, pode gerar pouca confiabilidade. Entretanto, informações importantes podem ser auferidas ao se mensurar a divergência de resultados obtidos por meio geofísico e pela metodologia tradicional, visto que, atualmente, a utilização isolada de métodos geofísicos para a determinação aproximada de perfis do terreno nem sempre é aconselhada ou utilizada, sendo preferidos os métodos de perfuração tradicionais para determinação das seções geotécnicas. Como exemplo podem ser citadas as obras recentes de ampliação dos portos de Itajaí(SC), São Francisco do Sul(SC) e Aratu(BA). Associado ao aspecto citado a resistência encontrada para implementação de novas tecnologias é importante para explicar a pouca utilização do método para a finalidade apresentada no presente trabalho. Entretanto, com base em estudos realizados até o momento, conforme apresentado em BUTLER, 2005, com a utilização de métodos de geofísica rasa espera-se obter bons resultados na análise de solos característicos de regiões marítimas, através da obtenção de respostas muito precisas.

Em vista do crescente desenvolvimento tecnológico, principalmente nos métodos computacionais e na tecnologia da informática, a aplicação de métodos geofísicos, antes utilizados, principalmente, para prospecção de petróleo, passa a ser viável comercialmente na engenharia civil, em vista da redução do tempo de processamento dos dados sísmicos obtidos.

Em obras de engenharia civil em meio marítimo é comum a necessidade de dragagem e/ou derrocagem de material para aumentar a profundidade da região em função da finalidade da obra. Em obras portuárias esse procedimento visa permitir a atracação de navios de maior calado. Com esse intuito, a utilização da prospecção geofísica do terreno torna-se uma excelente ferramenta, visto que permite visualizar as camadas de solo que deverão ser dragadas e derrocadas, sem exigir a realização de sondagens de percussão tradicionais que vislumbram não só a obtenção do perfil do terreno, mas também a sua resistência. Esse último parâmetro do solo citado não é necessário para a realização de obras dragagem/derrocagem. Dessa forma, é possível reduzir o custo e o tempo da prospecção do terreno para a realização desse modelo de obras. Mesmo em obras onde a obtenção da resistência do solo é de caráter fundamental, se realizadas prospecções geofísicas, a quantidade de sondagens a serem realizadas pode ser muito reduzida.

O principal objetivo deste trabalho é aplicar uma metodologia de imageamento do solo através de análise por sísmica rasa para obtenção de perfis geotécnicos em áreas molhadas e alagadas, onde existe maior dificuldade para realização das sondagens tradicionais. Para isso é necessária a utilização de algoritmos baseados em métodos numéricos para imageamento.

A partir de um modelo de subsuperfície sintético, i.e., gerado numericamente, cujas propriedades físicas são correspondentes àquelas de ambientes tipicamente marinhos (caracterizados por uma camada de argila mole ou areia sobre uma rocha sã), serão adotados algoritmos de modelagem direta para registrar o tempo de trânsito e a amplitude associada ao contraste de impedância entre materiais que constituem o solo, quando da passagem da frente de ondas. O método das Diferenças Finitas é o utilizado na modelagem, como será apresentado no próximo capítulo.

Para aquisição dos dados sintéticos simulou-se uma situação de campo, em que um equipamento em um barco emite uma energia sísmica através de uma fonte localizada em meio acústico (água). Parte da energia penetra no solo e parte é refletida para superfície, onde está o equipamento receptor, no mesmo barco, onde é gravada. A partir da geração dos sismogramas bidimensionais são aplicados métodos de migração sísmica para imagear o solo.

Os métodos de migração objetivam transformar a seção adquirida em tempo e migrá-la para uma seção em espaço, percorrendo o caminho inverso da aquisição, depropagando o sinal emitido para encontrar a seção geofísica desejada.

## **1.2. METODOLOGIA E OBJETIVOS**

Nesse trabalho será apresentado um modelo numérico para obtenção dos sismogramas sintéticos a partir de seções pré-definidas de mesmas larguras e profundidades, simulando a aquisição em campo. Normalmente, na prática, são usadas seções paralelas de mesmas dimensões para realizar a interpolação entre as mesmas e realizar o cálculo do volume de solo e rocha a ser removido. Para isso será utilizada uma frente de onda compressional, seguindo o princípio da superposição, visto que objetiva-se simular a modelagem zero *offset*<sup>1</sup>.

A seguir será realizada migração por Raio Vertical e Phase-Shift (GAZDAG, 1978), utilizando transformada de Fourier (STOLT, 1978) para obtenção do imageamento das seções sísmicas e para comparar o resultado final com o modelo de velocidades. Ao final será calculado o volume de solo e rocha a ser removido na área estipulada.

## **1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO**

Apresenta-se, a seguir, a disposição dos assuntos a serem abordados ao longo do trabalho, especificando os tópicos chave de cada capítulo.

---

<sup>1</sup> Distância nula entre a fonte emissora e o receptor do sinal.



No capítulo 2 são apresentadas as características principais da aquisição sísmica, descrevendo a teoria básica da mesma e ressaltando as particularidades da sísmica rasa com *offset* nulo.

No capítulo seguinte são apresentadas as modelagens realizadas, justificando-se a escolha pela modelagem acústica. Primeiramente descreve-se o termo fonte da equação da onda FM utilizada na prática, garantindo a semelhança com aquela utilizada em aquisições reais em seguida é apresentada a fonte gaussiana adotada na modelagem. A seguir, é explicado como realizar a modelagem sísmica utilizando operadores acústicos garantindo o cumprimento dos critérios de dispersão numérica e estabilidade. Ao final do capítulo são apresentados os modelos das seções sísmicas utilizadas e os sismogramas gerados a partir da metodologia apresentada.

A seguir apresenta-se descrição da migração dos sismogramas gerados para obtenção da seção sísmica em profundidade. A correspondente teoria é tratada no capítulo 4. No capítulo 5 estão apresentadas as resultantes das migrações dos sismogramas a partir dos métodos do Raio Vertical e Phase-Shift, com os valores comparativos da área de solo de cada seção. A partir dessas, por interpolação, apresenta-se o cálculo do volume de solo a ser removido. Finalizando, é apresentado um capítulo de conclusão do trabalho realizado, com sugestões de trabalhos futuros.

# CAPÍTULO 2

---

## 2 AQUISIÇÃO SÍSMICA

### 2.1. INTRODUÇÃO

O objetivo das aquisições sísmicas é obter dados contendo informações da subsuperfície para, posteriormente, por meio da migração sísmica, obter uma imagem/modelo geofísico e transformá-lo em uma imagem/modelo geológica de subsuperfície, de maneira a obter o perfil do terreno de forma fiel e contínua.

Segundo BUTLER, 2005 existem dois tipos de correlações, o problema direto, que propõe obter as características geofísicas a partir das propriedades geológicas e o problema inverso, que parte das propriedades geofísicas para obter as propriedades geológicas. Enquanto para cada geologia só é possível ocorrer um modelo geológico (apenas uma solução), o problema inverso (migração) tem sempre mais de uma solução, pois para cada modelo geofísico pode existir mais de um modelo geológico, o que gera certa incerteza nos dados geofísicos. Ou seja, uma modelagem geofísica gera somente um sismograma para a seção geológica, entretanto um sismograma pode gerar diferentes seções geológicas quando da realização da migração.

Uma aquisição sísmica pode ser influenciada por diversos fatores de diferentes origens, como característica das fontes e ruídos externos. Com isso, não há garantia de que gere sempre um mesmo sismograma. Isso só é possível analiticamente ou via modelagem, em que os ruídos podem ser controlados e as fontes não sofrem interferências, possuindo sempre as mesmas características matemáticas.

Para garantir a confiabilidade da migração dos dados obtidos para obtenção do perfil geológico, é necessário conhecer algumas características geofísicas da região estudada, como a velocidade de propagação da onda acústica nos meios em questão, e, assim, reduzir incertezas.

Dessa forma, o texto citado conclui que existe uma tendência em aplicações de engenharia em subsuperfície de obter características geológicas para cada aplicação, como sondagens pontuais posicionadas estrategicamente em meio à seção adquirida. Com isso, é possível obter a velocidade correta de propagação da onda na camada estratigráfica em questão, gerando, com maior precisão e confiabilidade, as estimativas das propriedades geofísicas do solo, necessárias para transformar a seção obtida em tempo para uma seção em profundidade, visto que a sondagem fornece a disposição pontual das camadas que constituem o solo e a aquisição sísmica fornece a seção em tempo.

Para a obtenção de resultados de qualidade na profundidade desejada, torna-se essencial a definição da resolução da aquisição: *“capacidade de se separar dois eventos próximos, pela menor distância que eles podem chegar, sem perder a individualidade”* (DUARTE, 1997).

A partir da equação da velocidade da onda ( $v = \lambda \cdot f$ ) e considerando o meio isotrópico e homogêneo, pode-se observar que, admitindo a velocidade de propagação da onda no meio independente da frequência, o comprimento da mesma ( $\lambda$ ) é inversamente proporcional à sua frequência ( $f$ ).

O comprimento de onda deve ser adequado à resolução desejada. Quando a aquisição é realizada a poucos metros de profundidade, como na situação estudada, onde se deseja um perfil geotécnico com menos de 50 m de profundidade, é necessário um comprimento de onda pequeno, que permita a visualização de pequenas alterações de propriedade. Para isso, torna-se necessário um sinal de alta frequência (segundo equação da velocidade da onda) e uma boa resolução.

Em aquisições de sísmica profunda, ao contrário do apresentado, a profundidade elevada de aquisição dificulta a utilização dos sinais de alta frequência, visto que o solo “filtra” as frequências mais elevadas e quanto maior a profundidade desejada, maior é o efeito citado, o que impede o retorno de frequências altas para o receptor. Dessa forma, a realização de aquisições em sísmica profunda não permite a visualização de pequenas alterações no perfil (alta frequência e pequeno comprimento de onda), visto que o pequeno

comprimento de onda não retorna e passam a ser usados sinais com comprimentos de onda maiores e frequência mais baixa, empobrecendo, conseqüentemente, a resolução.

Tabela 2.1 – Velocidade de propagação das ondas acústicas primárias em diferentes materiais.

<b>Material</b>	<b><math>V_p</math> (m/s)</b>
Água	1482
Ar	343
Argila	900 a 1800
Areia saturada	1500
Basalto/Rocha fraturada a sã	1700 a 2300
Rocha ígnea e metamórfica	450 a 3700
Rocha sedimentar	600 a 3000

A onda sísmica propaga-se em todas as direções sob a forma de ondas elásticas, e se desloca com uma velocidade variável com o meio de propagação, visto que seus movimentos ondulatórios dependem das características físico-químicas dos corpos atravessados.

Para efeito de análise, considera-se o meio elástico, homogêneo e isotrópico, por onde propagam ondas de corpo elásticas. Portanto, o meio possui equações de governo bem definidas.

Ondas sísmicas propagam-se nos corpos através de movimentos ondulatórios. Assim como qualquer onda, sua propagação depende das características físico-químicas dos corpos atravessados. As ondas sísmicas classificam-se em dois grupos principais: ondas geradas em focos sísmicos e que se propagam para o interior do globo, conhecidas por ondas interiores, profundas ou volumétricas, e ondas geradas a partir da chegada de ondas interiores à superfície terrestre, denominadas ondas superficiais.

As ondas interiores são subdivididas em dois tipos (ver figura 2.1):

1) Ondas primárias, de compressão, longitudinais ou simplesmente ondas P – são caracterizadas por um movimento vibratório em que as partículas oscilam na direção de propagação do raio sísmico, comprimindo e distendendo os materiais alternadamente; com isso, a direção de vibração das partículas é a mesma da propagação da superfície de onda.

2) Ondas de cisalhamento, transversais, ou simplesmente ondas S - provocam vibrações nas partículas na direção perpendicular à direção de propagação da onda.

As ondas P propagam-se nos meios sólidos, líquidos e gasosos. Como todas as ondas, ocorre variação de velocidade quando passam de um meio para o outro. As ondas S se propagam apenas em meios sólidos. A velocidade das ondas P e S varia com as propriedades dos materiais que atravessam, nomeadamente com a seu módulo de cisalhamento e com a sua massa específica (SILVA, 2007).

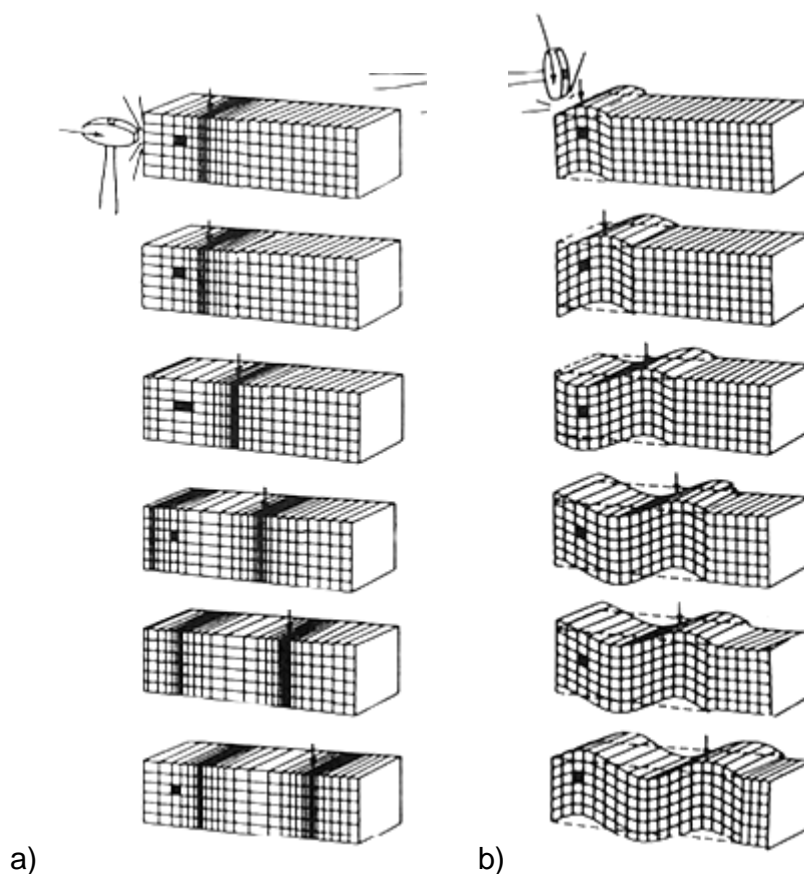


Figura 2. 1 – Movimento das partículas durante a passagem de uma onda: a) onda P; b) onda S (extraído de SHERIFF, 1995)

A velocidade da onda P ( $V_p$ ) é normalmente obtida através de perfilagem de poço, e pode ser estimada através de valores tabelados na literatura, como pode ser visto na Tabela 2.1 (BUTLER, 2005). Conhecidas as velocidades e considerando o meio isotrópico e homogêneo, é possível determinar as suas propriedades geotécnicas ou constantes elásticas como o módulo de elasticidade longitudinal ou de Young ( $E$ ), o módulo de elasticidade transversal ( $G$ ), a massa específica ( $\rho$ ) e a razão de Poisson ( $\nu$ ). As unidades de  $E$  e  $G$  são módulos em pressão, comumente em Pascal (Pa), das massas específicas em massa por volume e  $\nu$  é adimensional. Os termos acima se correlacionam segundo as equações da elasticidade linear, a seguir:

$$\nu = \frac{(V_p/V_s)^2 - 2}{2(V_p/V_s)^2 - 1} \quad (2.1)$$

$$E = \rho \cdot V_p^2 (1 - 2\nu) \cdot \frac{(1+\nu)}{(1-\nu)} \quad (2.2)$$

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (2.3)$$

$$\rho = \frac{G}{V_s^2} \quad (2.4)$$

## 2.2. PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DA AQUISIÇÃO SÍSMICA

As ondas elásticas (aproximação das ondas sísmicas, considerando que o meio de propagação é elástico) viajam com diferentes velocidades em diferentes tipos de materiais. Esse é o pressuposto do método sísmico, que utiliza ondas sísmicas para determinar a distribuição das velocidades e localizar interfaces onde as ondas são refletidas ou refratadas, emitindo ondas sísmicas e observando o tempo de chegada e a amplitude destas ondas em diferentes pontos. Com isso é possível determinar a distribuição de camadas do solo. Parte da energia do sinal é refletida sempre que encontra um material com impedância acústica diferente daquela onde está se propagando.

O coeficiente de reflexão, definido como a razão entre as amplitudes do sinal refletido e incidente (SHARMA, 1997), para incidência normal, relacionam-se através da equação (2.5) e figura 2.1.

$$R_c = \frac{A_R}{A_I} = \frac{\rho_2 \cdot v_2 - \rho_1 \cdot v_1}{\rho_2 \cdot v_2 + \rho_1 \cdot v_1} \quad (2.5)$$

Onde:  $A_R$  é a amplitude da onda refletida;

$A_I$  é a amplitude da onda incidente;

$\rho_1$  e  $\rho_2$  são as massas específicas dos meios 1 e 2 respectivamente;

$v_1$  e  $v_2$  são velocidades de propagação da onda nos meios 1 e 2 respectivamente;

Os registros sísmicos mostram os horizontes refletores (também denominados refletos sísmicos); cada refletor representa a interface entre duas camadas geológicas, conforme ilustrado na figura 2.2. A fonte a ser usada em cada aquisição marítima depende da aplicação desejada. Cada fonte emite um sinal dentro de um determinado espectro de frequência e com uma assinatura característica, com isso, conforme relacionado anteriormente, cada tipo de fonte é utilizado para uma finalidade.

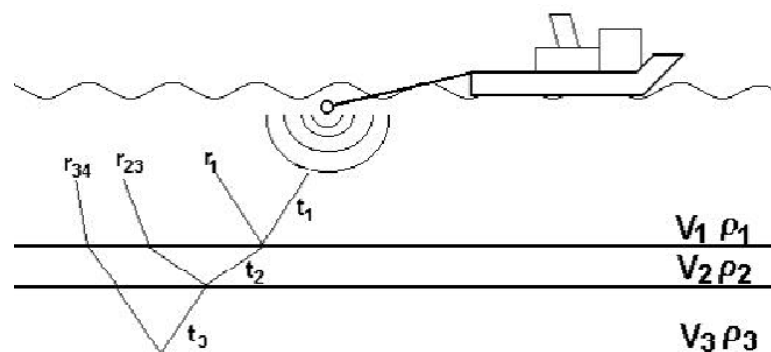


Figura 2. 2 – Transmissão e recepção do sinal sísmico de acordo com a variação da impedância acústica das camadas.

### 2.3. PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DA SÍSMICA DE SUBSUPERFÍCIE COM OFFSET NULO

A teoria para realização da aquisição sísmica de subsuperfície é muito similar à teoria da aquisição da sísmica convencional. Em ambas as situações, em meio aquático, reboca-se com um barco ou navio (sísmica profunda) o equipamento que emite a onda sísmica (fonte) e o equipamento que capta as ondas refletidas (hidrofone, receptor).

Quando se trata de offset nulo só é utilizado um receptor, que se encontra na mesma posição da fonte.

Para isso são utilizados equipamentos como o apresentado na figura a seguir, que emite a onda e capta suas reflexões.



SB-424 Towfish

Figura 2. 3 – Equipamento típico (3200-XS - SB-424 sub-bottom profiling system – Tektronix – Edgetech Marine) para aquisição em baixas profundidades.

O passo inicial para a obtenção dos perfis geotécnicos é a realização da aquisição sísmica conforme apresentado anteriormente. O resultado dessa aquisição é o sismograma da seção a ser estudada. Com o objetivo de se estudar novas metodologias, a modelagem numérica simula é utilizada para simular obtenção de dados em campo, assim como ocorre no presente trabalho, cujos sismogramas foram obtidos numericamente, conforme apresentado no capítulo seguinte.



De posse dos dados de poços ou furos SPT/percussão<sup>2</sup> localizados na seção adquirida, é possível inferir a velocidade de propagação da onda nos meios atravessados. Essa informação é imprescindível para a continuidade do processo, pois a partir dele é que será realizada a migração sísmica.

A partir das informações geofísicas da seção, é possível realizar a migração sísmica utilizando a teoria que melhor se aplica ao processo, conforme será apresentado no capítulo 4 da presente monografia e obter a seção em profundidade, conforme desejado.

Diferentemente da sísmica profunda, em subsuperfície o adensamento natural que ocorre nos solos ao longo da profundidade e que, com isso, faz com que a onda se propague com uma velocidade crescente com a profundidade, é muito inferior e não deve influenciar consideravelmente nos resultados finais, permitindo a adoção de uma velocidade de propagação da onda fixa para cada camada estratigráfica observada.

---

<sup>2</sup> Ensaio utilizado na engenharia civil para determinação das camadas de solo e sua resistência mecânica por meio de perfuração do solo e retirada de amostras.

# CAPÍTULO 3

---

## 3 MODELAGEM NUMÉRICA

### INTRODUÇÃO

Foram realizadas modelagens numéricas empregando método das diferenças finitas para a discretização a partir de modelos de velocidade conhecidos, gerados a partir de modelos geotécnicos adequados ao assunto estudado. Os perfis encontrados em regiões costeiras que sofreram forte ação do intemperismo, como a brasileira, em que as praias possuem fundo de solo são, normalmente, caracterizados por uma camada de areia saturada com sedimentos orgânicos e/ou argila orgânica saturada, seguidas de rocha saturada a sã.

Com base nessas premissas foram gerados os modelos de velocidades, baseadas em seções reais existentes, constituídas de uma camada de água, seguida por uma camada de argila e rocha sã, com velocidades de propagação da onda de 1.500 m/s, 1.600 m/s e 2.000 m/s respectivamente, conforme apresentado na tabela 2.1.

Como a razão entre a velocidade de propagação da onda na água (1.500 m/s) e a velocidade de propagação da onda na argila saturada (1.600 m/s) é aproximadamente 1 (precisamente 0,93 para o modelo de velocidade adotado), julgou-se uma aproximação coerente tratar a argila saturada como líquido, suprimir os termos da função da onda acústica referentes às ondas cisalhantes e trabalhar apenas com as componentes compressionais da onda, visto que a componente cisalhante não propaga em líquidos. Além disso, a presença de ondas cisalhantes iria gerar ruídos na ocasião da migração sísmica, visto que quando as mesmas entram em contato com meio líquido se transformam em ondas compressionais. Como o foco do trabalho não é caracterizar passo a passo a prática da aquisição sísmica, indicando a aplicação de filtros e demais métodos de retirada de múltiplas e sim verificar a acurácia do método e apresentar a metodologia básica do

processo, os modelos de velocidade foram construídos sem a caracterização das ondas cisalhantes.

Além disso, para reduzir o tempo computacional, optou-se por trabalhar com um sismograma equivalente à soma dos sismogramas de fonte/receptor unitários (Princípio da Superposição de Ondas). Para isso, ao invés de emitir apenas uma fonte, foi emitida uma “frente” de ondas compressionais.

Por se tratar de um modelo computacional, a propagação das ondas interpreta os limites externos (bordas) do modelo como obstáculos que geram reflexão como se houvesse alguma variação do meio. Para reduzir estes efeitos de borda são aplicados filtros que amortecem ondas que seriam refletidas artificialmente reduzindo ou até mesmo eliminando os efeitos indesejados. Na modelagem em questão adotaram-se áreas de amortecimento conforme proposto por (BORDING, 1997) que são parcialmente adequados à modelagem proposta. Para evitar múltiplas geradas pela reflexão na superfície superior do terreno, ela foi modelada com uma borda não reflexiva.

Múltiplas ou reflexão múltipla é a reflexão de uma mesma superfície ou interface que ocorre mais de uma vez antes de ser registrada (DUARTE, 1997).

## **APRESENTAÇÃO DO TERMO FONTE DA EQUAÇÃO DA ONDA**

Usualmente a aquisição marítima em pequenas profundidades é realizada utilizando uma fonte acústica FM de alta frequência, modelada por uma Gaussiana. A definição das frequências depende das características da aquisição, conforme figura 3.1.

Com base nas características do problema foi modelada uma fonte FM com frequência máxima de 24 KHz, frequência mínima de 4KHz e período de 0,3 s de acordo com a equação (3.1), na qual existe um sinal FM (CHOWNING, 1973) modelado por uma função Gaussiana (Figura 3.2).

$$F(t) = e^{-3.10^6 \cdot \pi \cdot t^2} \cdot \cos\left(2 \cdot \pi \cdot f_{min} + \pi \cdot \frac{f_{max} - f_{min}}{T} \cdot t\right) \quad (3.1)$$

Onde: t é o tempo;

$f_{min}$  e  $f_{max}$  são as freqüências mínima e máxima respectivamente, e

T é o período de propagação do sinal.

<b>Key Specifications</b>			
	<b>SB-0512i</b>	<b>SB-216S</b>	<b>SB-424</b>
Frequency Range	500 Hz-12 kHz	2-16 kHz	4-24 kHz
Pulse Type	Frequency Modulated		
Pulses (user selected)	2-12 kHz, 2-8 kHz, 1.5-7.5 kHz, 1-6 kHz, 1-5 kHz, 0.5-5 kHz	2-16 kHz, 2-12 kHz, 2-10 kHz	4-24 kHz, 4-20 kHz, 4-16 kHz
Vertical Resolution (depends on pulse selected)	8-20 cm	6-10 cm	4-8 cm
Penetration (typical)			
In coarse calcareous sand	20 meters	6 meters	2 meters
In clay	200 meters	80 meters	40 meters
Beam Width (depends on center frequency)	16°-32°	17°-24°	16°-23°
Size (centimeters)	160 (L) x 124 (W) x 47 (H)	105 (L) x 67 (W) x 40 (H)	77 (L) x 50 (W) x 34 (H)
Weight	190 kg	76 kg	45 kg
Cable Requirements	3 shielded twisted pairs (5 used)		
Maximum Operating Depth	300 meters		
Tow Speed	3 - 4 knots optimal, 7 knots maximum safe operation		
<b>System Options</b>	Integrated depth sensor, 4 kW amplifier, USBL acoustic tracking system		

*Specifications subject to change without notice.*

Figura 3. 1 – Características de um equipamento típico (3200-XS - SB-424 sub-bottom profiling system – Tektronix – Edgetech Marine) para aquisição em baixas profundidades.

Apesar da fonte ser limitada em freqüência, sua freqüência de corte (obtida após realizar a transformada de Fourier numérica) é da ordem de 50 KHz, conforme figura 3.2. Dessa forma, conforme será visto no item 3.3, pelos critérios de dispersão numérica e estabilidade, o grid da malha deveria ser de 6 mm, entretanto, isso tornaria o processo muito demorado. Como para fonte gaussiana (figura 3.3), foi obtido um grid de 2,5 cm pelo mesmo critério, a mesma será utilizada para a modelagem numérica, dispensando a fonte FM.

É importante ressaltar, que para o estudo realizado a migração não será realizada da mesma forma que ocorre em uma migração real, na qual transforma-se o pulso utilizado em um pulso unitário aplicando-se o filtro de Wiener no sismograma. Como no presente

estudo não será abordada a aplicação de filtros, torna-se necessária a substituição da fonte utilizada na modelagem, para agilizar o processo da modelagem.

A expressão que descreve a variação temporal da fonte gaussiana (BULCÃO, 2004) está representada na equação (3.2) e possui freqüência de corte ( $f$ ) de 2 KHz.

$$F(t) = \left\{ 2 - 4 \left[ \pi \cdot f \left( t - \frac{1}{f} \right) \right]^2 \right\} \cdot e^{-\left[ \pi \cdot f \left( t - \frac{1}{f} \right) \right]^2} \quad (3.2)$$

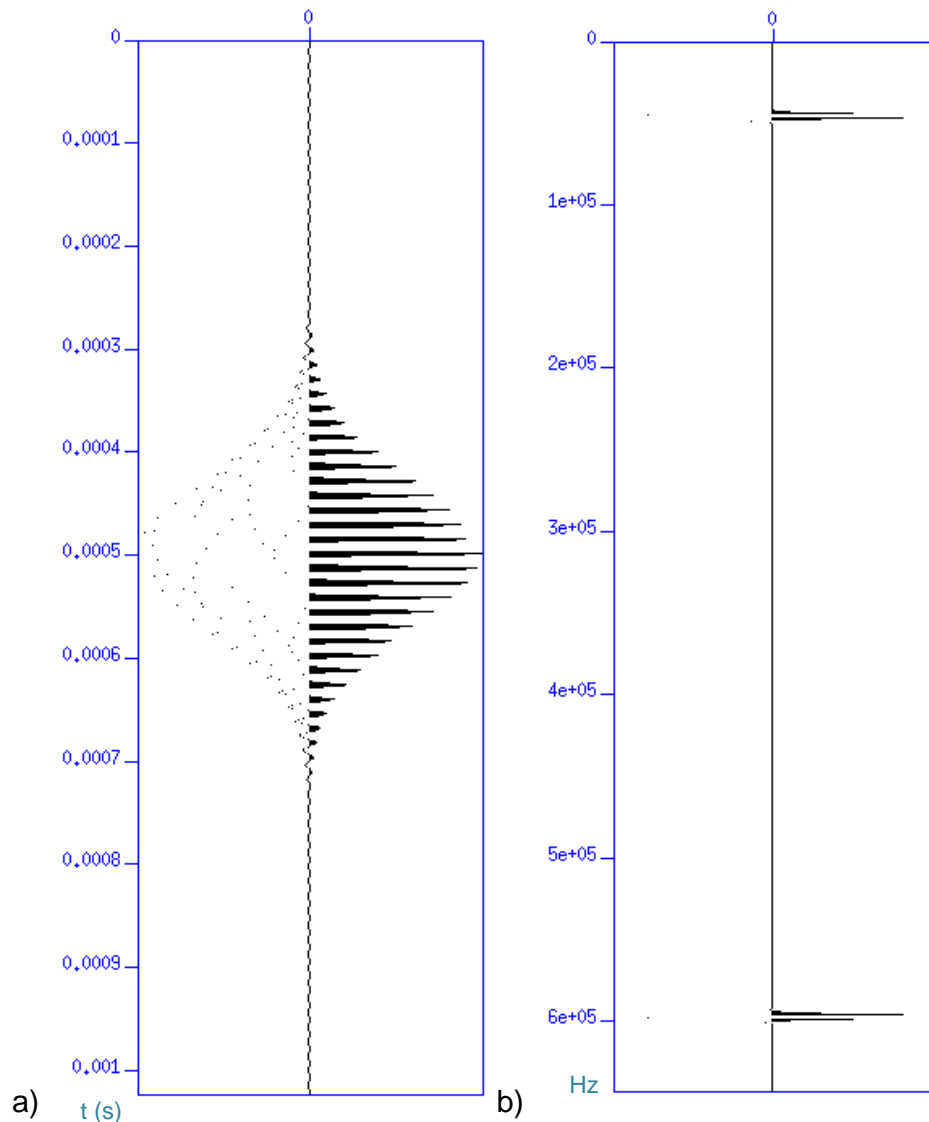


Figura 3.2 – a) Fonte FM modelada por uma Gaussiana; b) Espectro de freqüência da fonte FM em Hz

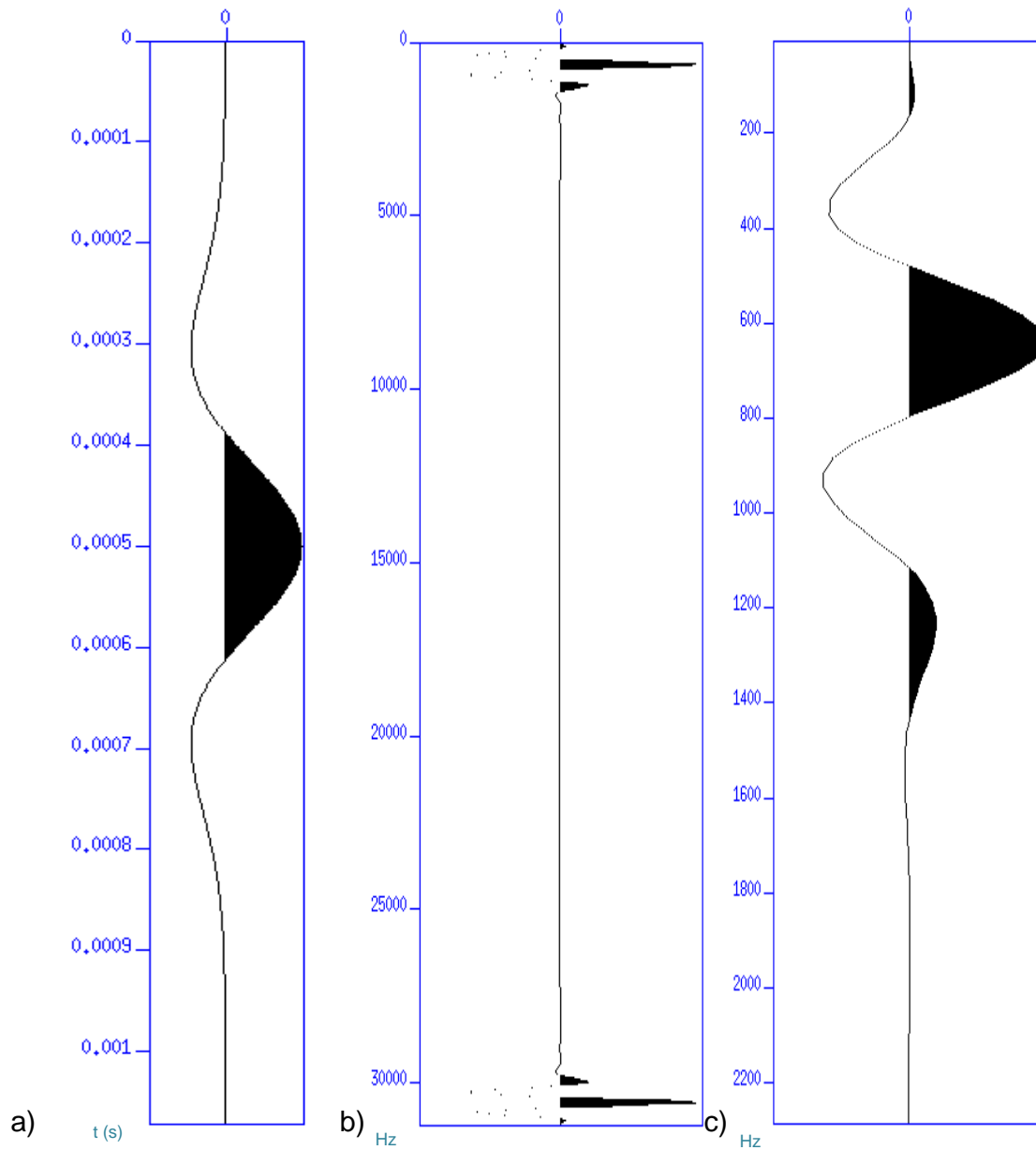


Figura 3.3 – a) Fonte gaussiana; b) Espectro de frequência da fonte gaussiana em Hz; c) Detalhe do espectro de frequência da fonte gaussiana em Hz.

### CRITÉRIO DE DISPERSÃO NUMÉRICA E ESTABILIDADE

Dispersão numérica e estabilidade são critérios a serem satisfeitos para que os resultados numéricos obtidos a partir da discretização das equações diferenciais pelo

método das Diferenças Finitas representem uma boa solução para o problema dinâmico abordado (BULCÃO, 2004).

Esses critérios permitem definir o espaçamento entre pontos do grid e o intervalo de tempo para o avanço da solução ao longo do tempo, conforme apresentado nos trabalhos de LOEWENTAL ET AL(1985), MUFTI (1990), FARIA (1986 e 1993) e SILVA (1995).

No trabalho apresentado por BULCÃO (2004), os critérios são definidos e a formulação específica apresentada para a metodologia utilizada na discretização através do método das Diferenças Finitas. Nos problemas envolvendo propagação de ondas acústicas e elásticas, satisfazendo-se as equações (3.3) e (3.4), garante-se não haver problemas na resposta em relação à dispersão numérica e à estabilidade.

$$h \leq \frac{V_{min}}{\alpha \cdot f_{corte}} \quad (3.3)$$

$$\Delta t \leq \frac{h}{\beta \cdot V_{max}} \quad (3.4)$$

Nas expressões acima:

$h$ : o espaçamento entre os pontos do grid, considera-se um grid regular, com mesmo espaçamento em todas as direções consideradas;

$\Delta t$  é o intervalo de tempo empregado para a solução numérica;

$f_{corte}$  é a frequência de corte da fonte sísmica;

$V_{min}$  e  $V_{max}$  são, respectivamente, as velocidades mínima e máxima de propagação presentes no modelo de velocidade analisado;

$\alpha$ : é um parâmetro empírico que determina quantos pontos do grid devem ser empregados para representar o menor comprimento de onda (considerando a frequência de corte e a menor velocidade de propagação);

$\beta$ : é um parâmetro empírico que determina quantos intervalos de tempo são necessários para que a frente de onda percorra uma distância equivalente ao espaçamento entre os pontos do grid (considerando a maior velocidade de propagação);

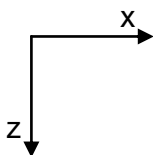
Embasado nas referências citadas anteriormente, adou-se o método das Diferenças Finitas com operadores de segunda ordem para as derivadas temporais. Quando empregam-se operadores de segunda ordem para as derivadas espaciais, deve-se adotar os valores do parâmetro  $\alpha$  próximos a dez (10) (BULCÃO, 2004), e quando adotam-se operadores de quarta ordem para derivadas espaciais, esse número pode ser reduzido à metade.

Para operadores de segunda ordem para as derivadas temporais, valores de  $\beta$  próximos a quatro (4) são suficientes para garantir estabilidade numérica com elevada precisão, (BULCÃO, 2004).

É importante ressaltar que os erros introduzidos pelas aproximações oriundas do Método das Diferenças Finitas estão ligados às definições do intervalo de tempo ( $\Delta t$ ) e espaçamento entre pontos ( $h$ ) e que estes fatores são inversamente proporcionais ao tempo de processamento e demanda computacional de memória para armazenar as variáveis envolvidas no processo.

## MODELAGEM NUMÉRICA UTILIZANDO DIFERENÇAS FINITAS

Conforme apresentado no capítulo 1, o problema estudado não contempla ondas cisalhantes (ondas-S) em função das hipóteses simplificadoras utilizadas, com isso a modelagem a ser adotada utiliza operadores acústicos, assumindo o meio físico como sendo regido pela Equação Acústica da Onda, a seguir, visto que a mesma só utiliza ondas compressionais (ondas-P).



$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} + srt(\Omega, t) \quad (3.5)$$



Onde:

$P$  é o campo de pressão da onda;

$c$  é a velocidade de propagação da onda no meio;

$t$  é o tempo;

$x$  é a coordenada na direção horizontal de propagação das ondas;

$z$  é a coordenada na direção vertical (cresce com a profundidade) de propagação das ondas;

$\Omega$  representa o domínio físico do problema;

$srt(t)$  representa o termo fonte, ou seja, é o termo gerador da onda aplicado em determinado ponto do domínio  $\Omega$ .

É interessante ressaltar que o único termo variável com o meio físico na equação (3.5) é a velocidade de propagação da onda. Essa é a razão pela qual as seções que definem os modelos de propriedades são conhecidas por modelos de velocidade.

O programa de diferenças finitas foi desenvolvido com aproximações de quarta ordem para o espaço e aproximação de segunda ordem no tempo, segundo equações a seguir (BULCÃO, 2004).

$$p_{[i,j]}^{t+\Delta t} = \frac{(\Delta t)^2}{12h^2} c_{[i,j]}^2 \left( \begin{array}{c} -p_{[i+2,j]}^t - p_{[i-2,j]}^t - p_{[i,j+2]}^t - p_{[i,j-2]}^t + \\ +16(p_{[i+1,j]}^t + p_{[i-1,j]}^t + p_{[i,j+1]}^t \pm p_{[i,j-1]}^t) \\ -60(p_{[i,j]}^t) \end{array} \right) \quad (3.6)$$
$$+2p_{[i,j]}^t - p_{[i,j]}^{t-\Delta t}$$

Onde:

Os índices subscritos [i,j] são empregados para referenciar as coordenadas do *grid*, para as direções x e z, respectivamente;

*h* expressa o espaçamento do *grid*, ou seja, o intervalo espacial entre os pontos da discretização. No presente estudo emprega-se um *grid* regular, com um mesmo espaçamento nas direções x e z.

Na variável *p* os índices sobrescritos e subscritos indicam, respectivamente, o instante de tempo considerado e o ponto do *grid* no qual a grandeza se localiza.

## MODELOS DE VELOCIDADE

Com base em imagens em AutoCAD foram geradas imagens em formato \*.jpg nos quais a velocidade de cada camada é representada por uma tonalidade de cinza em RGB, obtida a partir da seguinte equação.

$$RGB_{LAYER} = \left( \frac{V_{LAYER} - V_{max}}{V_{min} - V_{max}} \right) \cdot 255 \quad (3.7)$$

Onde:

$V_{LAYER}$  representa a velocidade da camada para a qual se está calculando o valor do *RGB*;

$V_{max}$  e  $V_{min}$  são as velocidades máxima e mínima no modelo de velocidades, respectivamente.

O formato de imagem adotado (\*.jpg), por ser um formato comprimido, gera interferências nas cores nas regiões limítrofes entre as mesmas. Com isso, surgem cores diferentes daquelas representativas de cada camada e torna-se necessário a edição das

imagens (foi usado o programa Paint da Microsoft) para retirar essas cores que gerariam interferência nos modelos de velocidades.

A partir de então, utilizando no sistema operacional Linux o comando “*convert*”, a imagem passou para o formato \*.xpm a partir do qual foi gerada a seção sísmica em formato binário, com a utilização de um programa específico. As imagens geradas estão representadas nas figuras 3.4 e 3.5. Com base em seções geotécnicas conhecidas foram montados 6 modelos de velocidade para modelagem numérica. As velocidades admitidas estão representadas na tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Velocidade de propagação da onda acústica em diferentes meios.

<b>Material</b>	<b>Velocidade (m/s)</b>	<b>Escala de cores RGB</b>
Água	1.500	255
Solo argilo arenoso saturado	1.600	204
Rocha - folhelho	2.000	0

Para cada modelo de velocidade foi identificada a área referente ao solo, conforme tabela 3.2.

Tabela 3.2– Área de solo obtida nos modelos de velocidade

<b>Seção</b>	<b>Área de solo (m<sup>2</sup>)</b>
Seção A	844,15
Seção B	563,95
Seção C	389,08
Seção D	803,12
Seção E	574,52
Seção F	1501,35

Nos modelos de velocidade foram definidas as dimensões de cada pixel como sendo  $\Delta x \times \Delta y$ , definidos na tabela 3.3, que define também demais parâmetros adotados para realização das modelagens.

Tabela 3.3: Parâmetros utilizados para modelagem

Parâmetros da modelagem	Valores
$\Delta x$ Grid	2,5 cm
$\Delta y$ Grid	2,5 cm
$\Delta t$	$2,5 \cdot 10^{-6}$ s
Frequência	2,0 kHz
Dimensões do modelo	600 x 11920 pixels
Dimensão das camadas de amortecimento	102 pixels

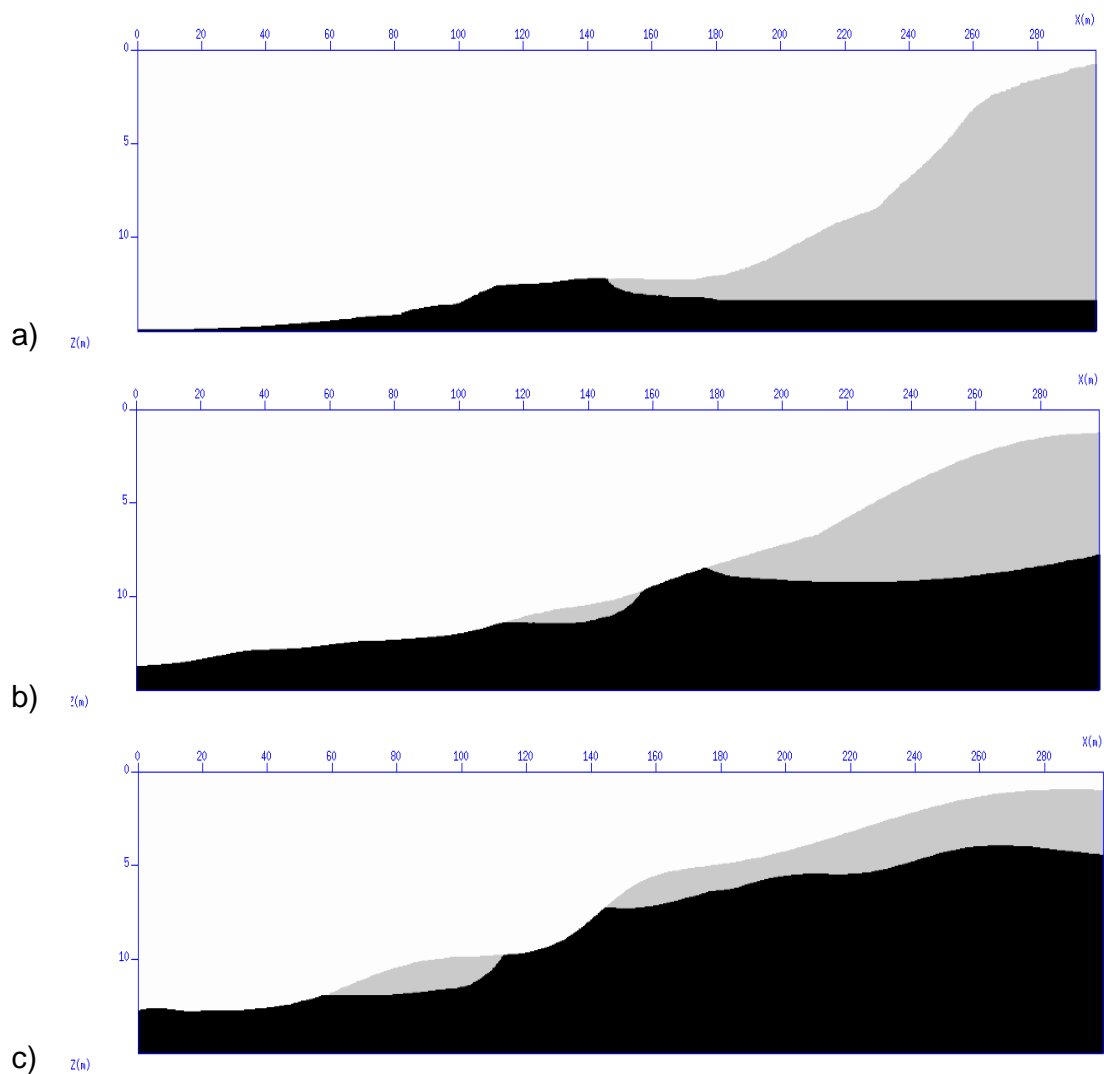


Figura 3.4 – Modelos de velocidade utilizados: a) Seção A; b) Seção B; c) Seção C; d) Seção D; e) Seção E; f) Seção F.

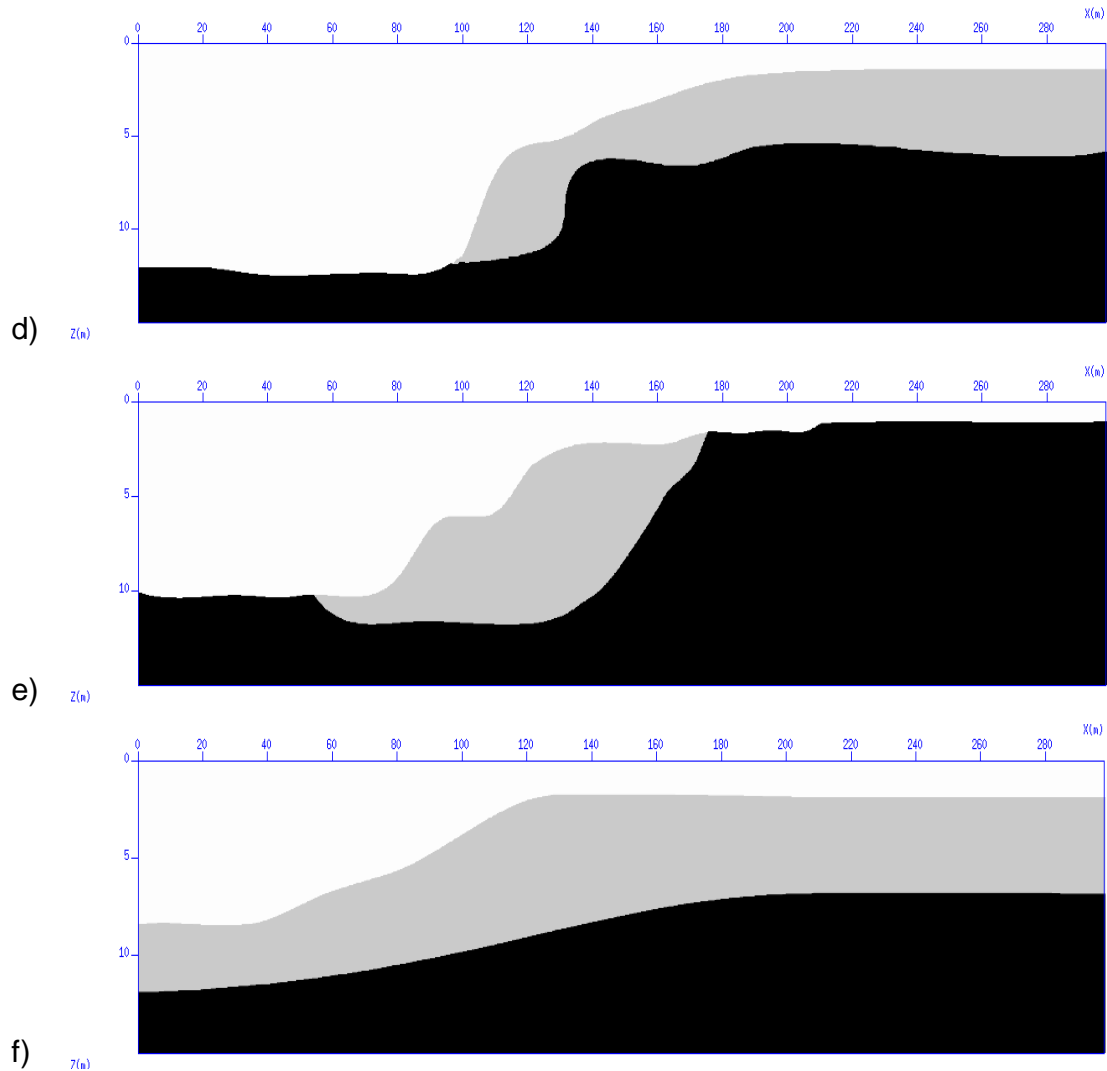


Figura 3.5 – Modelos de velocidade utilizados: a) Seção A; b) Seção B; c) Seção C; d) Seção D; e) Seção E; f) Seção F.

Todos os modelos apresentados são baseados em seções reais obtidas por prospecção tradicional. Cada seção, entretanto, possui características particulares, como inclinação das camadas geológicas. Normalmente essas camadas possuem pequena inclinação, entretanto, podem ocorrer taludes mais verticalizados, como nas seções D e E.

## SISMOGRAMAS GERADOS

Em campo, a aquisição sísmica será realizada com off-set nulo. Baseado no princípio físico da superposição de ondas foi realizada a modelagem através da propagação de uma frente de ondas compressoriais para obter um sismograma resultante igual à soma dos sismogramas obtidos por fontes unitárias de off-set nulo.

Os sismogramas gerados a partir da modelagem numérica estão representados nas figuras 3.6 e 3.7. É possível distinguir a presença de hipérbolas que representam pontos difratores no modelo de velocidades ou ainda geradas em função da camada de amortecimento.

Em trechos onde ocorrem variações mais relevantes na continuidade das seções, esses pontos difratores se tornam mais aparentes. São bem visíveis na seção D, na região do flanco vertical, mas também podem ser evidentes nas demais seções com variações bruscas na continuidade das linhas formadas pela maior amplitude de reflexão das ondas captadas pelo equipamento, como pode ser observado, também, nas seções A, C e E.

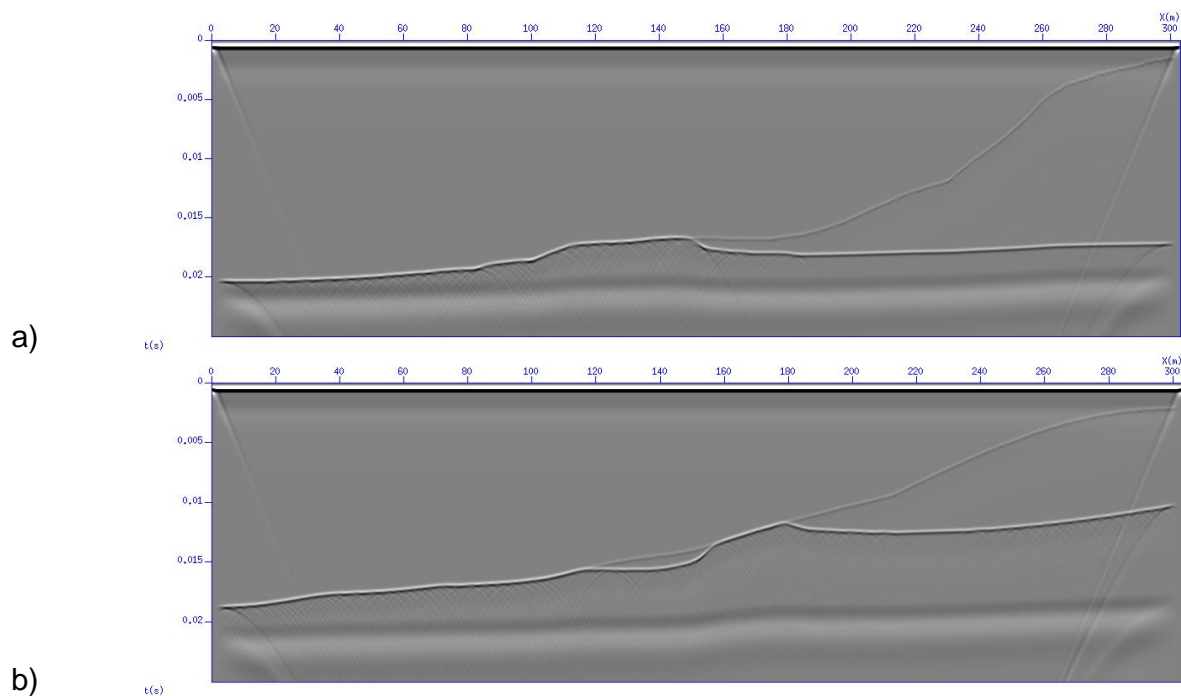


Figura 3.6 –Sismogramas gerados: a) Sismograma Seção A; b) Sismograma Seção B.

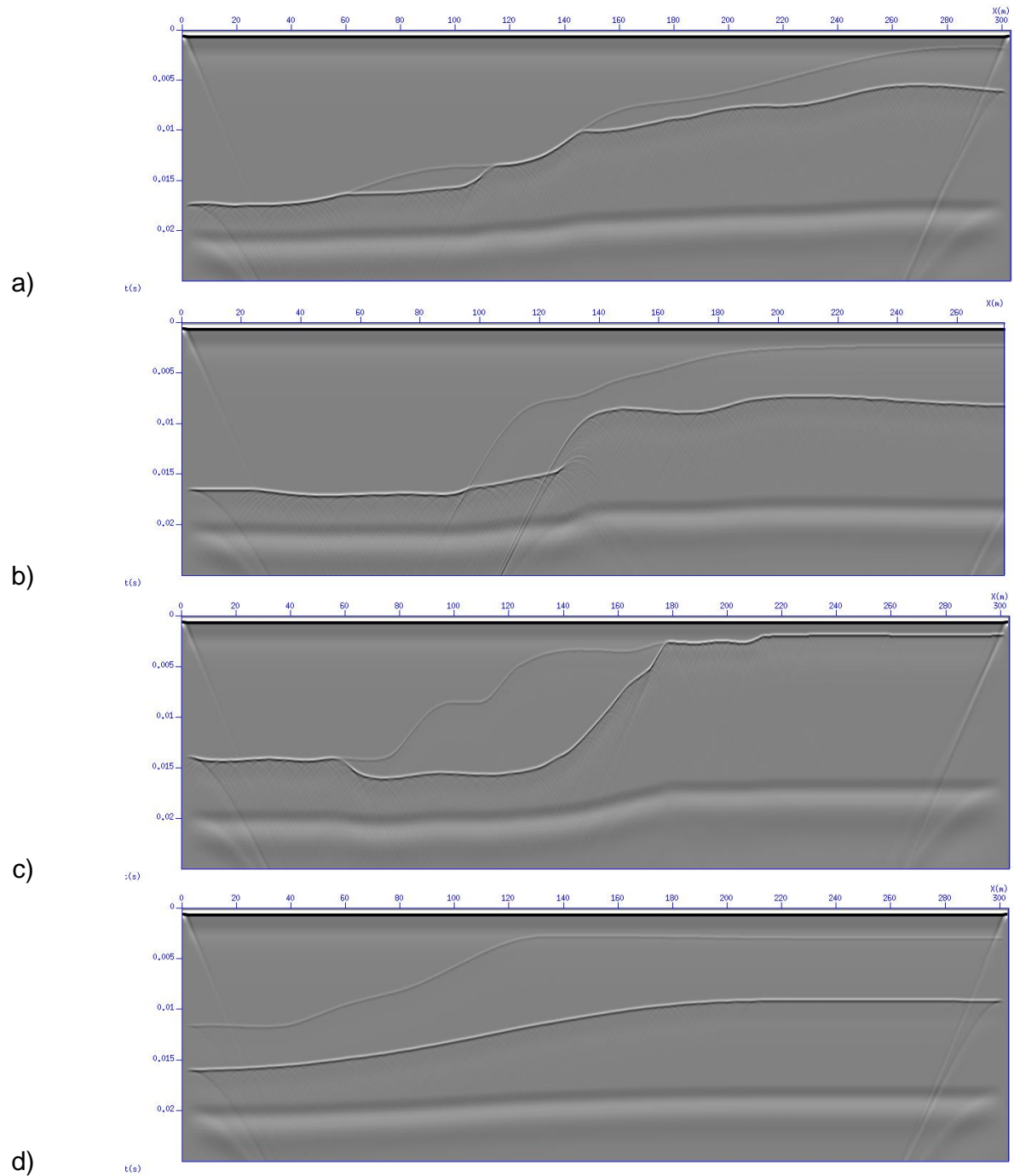


Figura 3.7 –Sismogramas gerados: a) Sismograma Seção C; b) Sismograma Seção D; c) Sismograma Seção E; d) Sismograma Seção F.

Nos sismogramas das figuras 3.6 e 3.7, é possível observar a presença de uma reflexão fraca na região inferior da imagem e reflexões laterais não representativas dos

modelos de velocidades, que devem-se à condição de contorno utilizada. O efeito da condição de contorno também pode ser observado na parte superior dos sismogramas.

Essas reflexões laterais formam hipérbolas que podem ser observadas em todos os sismogramas e também caracterizam pontos difratores. Já a reflexão gerada pelo limite inferior do modelo de velocidades gera uma onda refletida que também pode ser observada na região inferior de todos os sismogramas, como se existisse uma nova camada no modelo de velocidades.



# CAPÍTULO 4

---

## 4 MIGRAÇÃO SÍSMICA

### 4.1. INTRODUÇÃO

Para converter o sismograma gerado em uma seção geo-sísmica/geotécnica é utilizado o processo da migração sísmica. Existem diferentes metodologias para a realização da migração dos dados obtidos em campo. A mais simples consiste na conversão por raio vertical, na qual a seção geotécnica é obtida pela simples multiplicação da seção em tempo (sismograma) pela velocidade de propagação da onda no meio. É eficaz para a determinação da primeira interface (no caso de meios homogêneos), mas não é representativa no caso de mais de uma camada estratigráfica. Será apresentado o resultado por meio desta com o intuito de comparar os resultados finais obtidos.

A migração pelo método *Phase-Shift* (GAZDAG, 1978) utiliza a transformada de Fourier para realizar a migração no domínio da frequência e número de onda, em seguida realiza a transformada de Fourier inversa para obter a seção sísmica em profundidade. É um método computacional mais caro que a migração por raio vertical, mas que apresenta uma precisão mais apurada em relação às camadas com variação ao longo da profundidade da seção geotécnica. Havendo variação horizontal das propriedades da camada, pode-se usar o método *Phase-Shift-Plus-Interpolation* (PSPI).

Além dessas, existe a migração Kirchhoff e a RTM. Dentre todas a Kirchhoff é a mais usada, visto que apresenta melhor custo computacional, mas apresenta uma série de limitações, como a necessidade de um campo de velocidades suavizado. A RTM é a mais precisa, entretanto é muito cara computacionalmente. Neste caso, em função da simplicidade das seções geotécnicas iria demandar muito tempo para obtenção da seção em profundidade, com custo operacional que não necessariamente será absorvido pela empresa responsável pela determinação dos volumes de solo.

## 4.2. MIGRAÇÃO POR RAIOS VERTICAIS

A migração por raio vertical é uma técnica geométrica que consiste em transformar o sismograma obtido em uma seção em profundidade considerando que a velocidade de propagação no meio varie apenas com a profundidade. A conversão por raio vertical assume que o tempo de viagem representa a informação em linhas verticais contendo o ponto onde houve a emissão. O resultado é bastante razoável em seções simples com pouca variação lateral (LINER, 2004). Para realizar a conversão vertical a partir de raios que interceptam o refletor com incidência normal, a migração por raio imagem é a mais precisa conversão em profundidade para interpretação de seções, opera em dados zero *off-set* e incorpora os efeitos da refração. A migração utilizada é ainda mais simples, tratando-se de uma aproximação para modelos simples.

Como em seções aquáticas a velocidade de propagação da onda no solo submerso é muito próxima da velocidade de propagação da onda na água, adotou-se a velocidade de propagação da água para realização da migração. Dessa forma é possível assegurar que a posição da primeira camada de solo será muito próxima da real, sendo uma técnica muito eficiente para a definição da profundidade do mar, normalmente definida pela batimetria. Entretanto, como se pretende obter a área da seção geotécnica composta por solo, é necessário alcançar a segunda reflexão da onda. No modelo adotado a onda propaga no solo a uma velocidade de 1.600 m/s. Como o modelo possui uma extensão média de aproximadamente 15 m, espera-se um erro da ordem de 15 cm, visto que a velocidade adotada de propagação é de 1.500 m/s.

As seções obtidas após a migração estão representadas nas figuras a seguir.

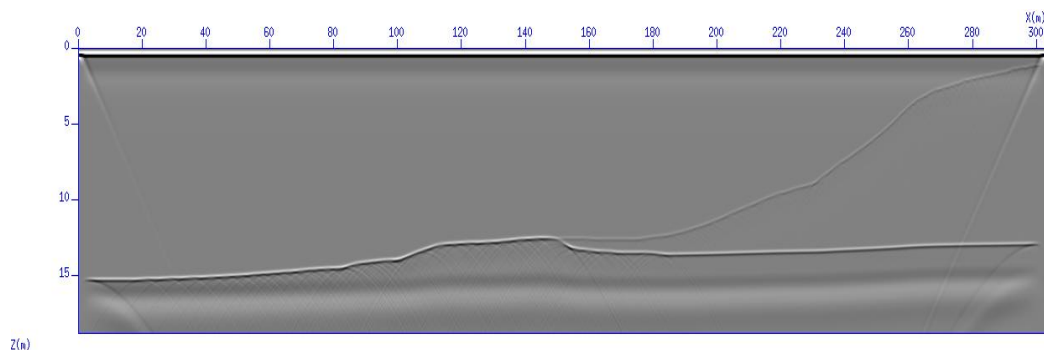


Figura 4. 1 – Seção obtida por migração por raio vertical: Seção A.

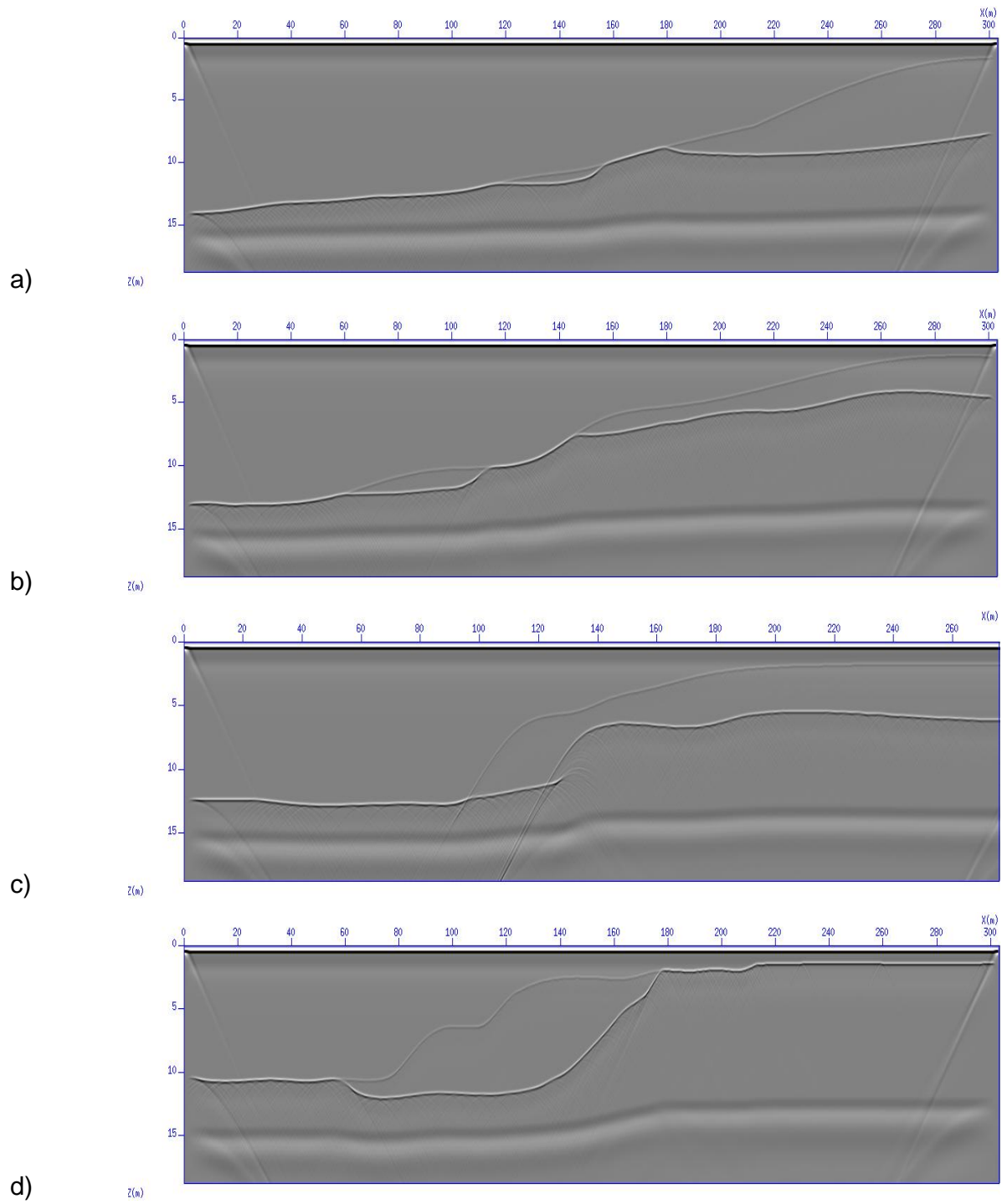


Figura 4. 2– Seções obtidas por migração por raio vertical: a) Seção B, b) Seção C, c) Seção D, d) Seção E.

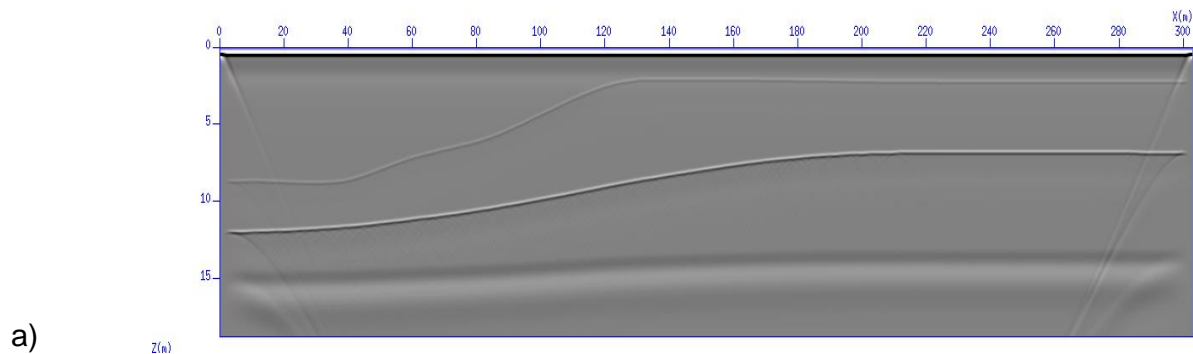


Figura 4. 3– Seção obtida por migração por raio vertical: a) Seção F.

O cálculo das áreas de solo foi realizado pelo programa AutoCad, onde as imagens eram inseridas. As áreas a serem calculadas foram obtidas através da inserção de hachuras dentro dos limites demarcados manualmente, acrescentando ao erro do programa o erro humano ao desenhar os limites no programa de desenho técnico. Os resultados obtidos encontram-se na tabela 4.1, a seguir.

Tabela 4.1 – Área de solo nas seções em velocidade obtidas por migração por Raio Vertical

Seção	Área de solo (m <sup>2</sup> )	Erro percentual (%)
Seção A	811,32	-3,9
Seção B	534,23	-5,3
Seção C	362,13	-6,9
Seção D	694,68	-13,5
Seção E	536,86	-6,6
Seção F	1409,30	-6,1

Os erros percentuais foram calculados através da diferença do valor obtido e do valor real dividida pelo valor real de cada área de solo.

O maior erro percentual deve-se ao fato de o sismograma não ter sido propriamente migrado, gerando um erro em função da não utilização das velocidades corretas. Somado

ainda ao erro humano e ao flanco (descontinuidade) na seção D, onde se encontra o maior erro percentual.

É importante ressaltar que os valores dos erros possuem sinal negativo em função de a velocidade utilizada para migração (1.500 m/s) ser menor que a velocidade de propagação da onda no solo (1.600 m/s).

### 4.3. MÉTODO PHASE-SHIFT

A migração dos dados sísmicos pode ser sintetizada em três etapas: 1- Depropagação do campo de onda registrado na superfície, 2- Determinação dos tempos de trânsito para o imageamento e 3- Imposição da condição de imagem (SANTOS, 2003).

Ao escolher as técnicas de diferenças finitas, para a criação de modelo sintético, e de rotação de fase, para a migração, há maior garantia de que os algoritmos foram modelados corretamente, pois ao se utilizar apenas uma técnica os erros que por ventura ocorrerem, não aparecem nos processos.

Partindo da equação acústica da onda (Equação (3.5)) e representando o campo de pressão por uma série de Fourier, chega-se à seguinte equação:

$$p(x, z, t) = \sum_{k_x} \sum_w P(k_x, z, \omega) \cdot e^{i(k_x x - \omega t)} \quad (4.1)$$

Onde:

$k_x$  representa o número de onda em  $x$  e  $w$  representa a componente vertical em  $z$ .

Substituindo a Equação (4.1) em (3.5), tem-se a Equação (4.2):

$$\sum_{k_x} \sum_w \left[ \frac{\partial^2 P(k_x, z, \omega)}{\partial z^2} - k_x^2 \cdot P(k_x, z, \omega) + \frac{\omega^2}{c^2(x, z)} P(k_x, z, \omega) \right] \cdot e^{i(k_x x - \omega t)} = 0 \quad (4.2)$$

A Equação (4.2) só tem solução se o termo que multiplica a exponencial for zero, com isso a equação abaixo é válida para todos os valores de  $k_x$  e  $\omega$ .

$$\frac{\partial^2 P(k_x, z, \omega)}{\partial z^2} = \left( k_x^2 - \frac{\omega^2}{c^2(x, z)} \right) \cdot P(k_x, z, \omega) \quad (4.3)$$

Para uma velocidade constante e  $k_z$  uma constante para valores dados de  $k_x$  e  $\omega$ , existe uma relação apresentada pela próxima equação, conhecida por relação de dispersão.

$$k_z = \pm \left( \frac{\omega^2}{c^2} - k_x^2 \right)^{1/2} \quad (4.4)$$

A equação (4.3) é uma equação diferencial ordinária que pode ser escrita, então, da seguinte forma:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial z^2} = -k_z^2 \cdot P \quad (4.5)$$

Para  $k_z$  constante, a Equação (4.5) passa a ter solução analítica da forma:

$$P(k_x, z_0 + z, \omega) = e^{ik_z z} P(k_x, z_0, \omega) \quad (4.6)$$

A Equação (4.6) mostra que dado o campo de pressão na profundidade  $z_0$  é possível obter o campo de pressão em qualquer profundidade, caso a velocidade de propagação no meio seja constante. Entretanto, um campo de pressão conhecido na profundidade  $z_0$  pode

propagar tanto para tempos progressivos como para tempos regressivos. Também pode propagar para profundidades maiores ou menores que  $z_0$ . Para determinar a direção de propagação é necessário analisar os valores e o sinal de  $k_z$ .

O resultado da Equação (4.4) é real se satisfizer a condição  $\omega^2/c^2 - k_x^2 \geq 0$ , o que propiciará a propagação das ondas planas da Equação (4.6) e para os valores imaginários serão propagadas as ondas evanescentes. A solução representada na Equação (4.6) é a transformada de Fourier do campo de ondas. A solução geral em coordenadas espaço-tempo é obtida pela soma de todos os coeficientes de Fourier obtidos pela Equação (4.6) (SANTOS, 2003).

$$p(x, z, t) = \sum_{k_x} \sum_{\omega} P(k_x, z, \omega) \cdot e^{ik_z z} \cdot e^{i(k_x x - \omega t)} \quad (4.7)$$

A equação (4.7) soma todas as ondas planas ( $e^{i(k_x x - \omega t)}$ ) para obter a solução geral. É necessário examinar o sinal de  $k_z$  que faz extrapolar para cima a onda (ascendente) e cada solução da onda plana. Se  $k_x x$ , que determina a variação lateral, for ignorado, pode se escrever a fase  $\phi(z, t) = k_z z - \omega t$  (SANTOS, 2003).

Como a fase é constante para uma onda plana, escreve-se  $k_z z = \omega t + const$ , para uma determinada onda plana. Se a onda plana se move para baixo (descendente) então  $k_z$  tem o mesmo sinal que  $\omega$ , já que  $z$  aumenta com  $t$  para deixar a fase constante.

Para ondas ascendentes, os sinais de  $k_z$  e  $\omega$  têm de ser opostos ( $z$  decresce e  $t$  está aumentando). Essa informação está correlacionada a qual profundidade pretende-se encontrar o campo de pressão.

Se o campo for conhecido em uma profundidade  $z_0$ , e se quer achar o campo de pressão na profundidade  $z_0 + z$ , então o campo deve ser propagado para valores decrescentes de  $t$  (até a condição de imagem  $t = 0$ ). Essa é a direção que interessa para depropagar o campo registrado na superfície. Ou se o campo conhecido está em uma

profundidade  $z_0$  e se quer achar o campo na profundidade  $z_0 - z$ , então propaga-se o tempo para frente. Essa é a direção que interessa para modelagem.

Para variações de velocidade  $c(z)$ , os valores na profundidade  $k_z$  são considerados constantes somente para pequenos intervalos de profundidade ( $\Delta z$ ), que é onde se pode considerar a velocidade constante. A Equação (4.6) pode ser reescrita como a seguir e pode ser usada para modelagem ou migração.

$$P(k_x, z + \Delta z, \omega) = e^{ik_z \Delta z} P(k_x, z_0, \omega) \quad (4.8)$$

a. RESULTADO MIGRAÇÃO PELO MÉTODO PHASE-SHIFT

Com base no apresentado anteriormente, foi modelado o algoritmo para realizar a migração dos sismogramas apresentados no item 4.2. Os resultados estão dispostos nas figuras a seguir.

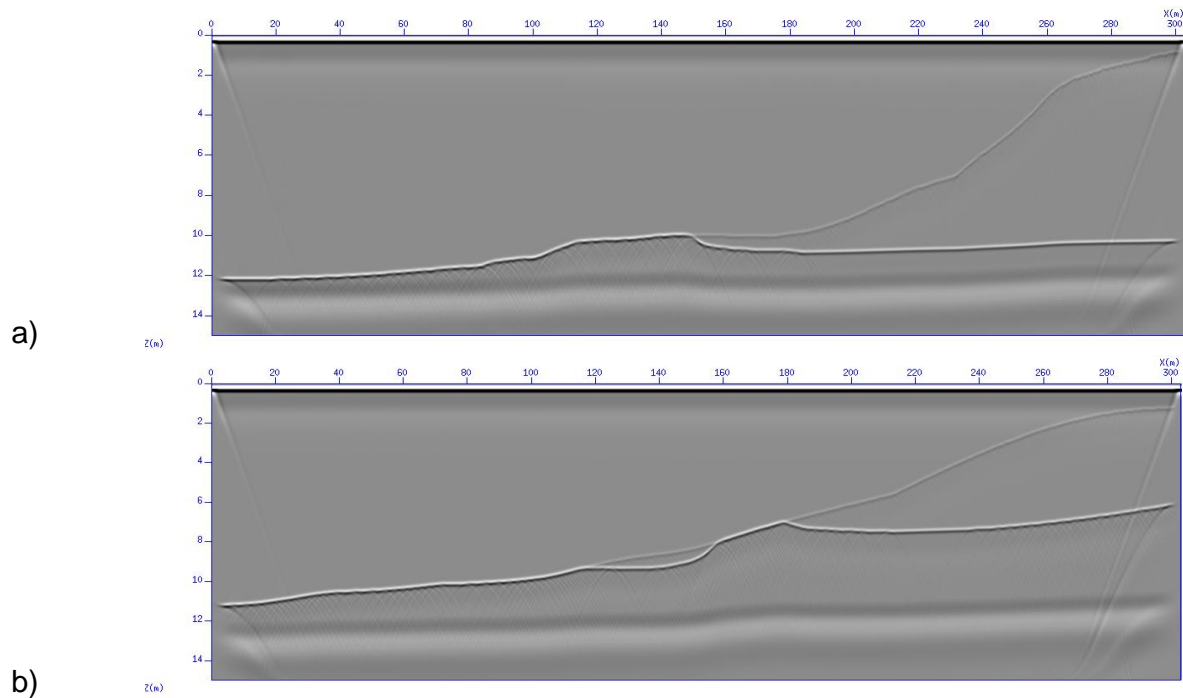


Figura 4. 4– Seções obtidas por migração Phase-Shift a) Seção A; b) Seção B.



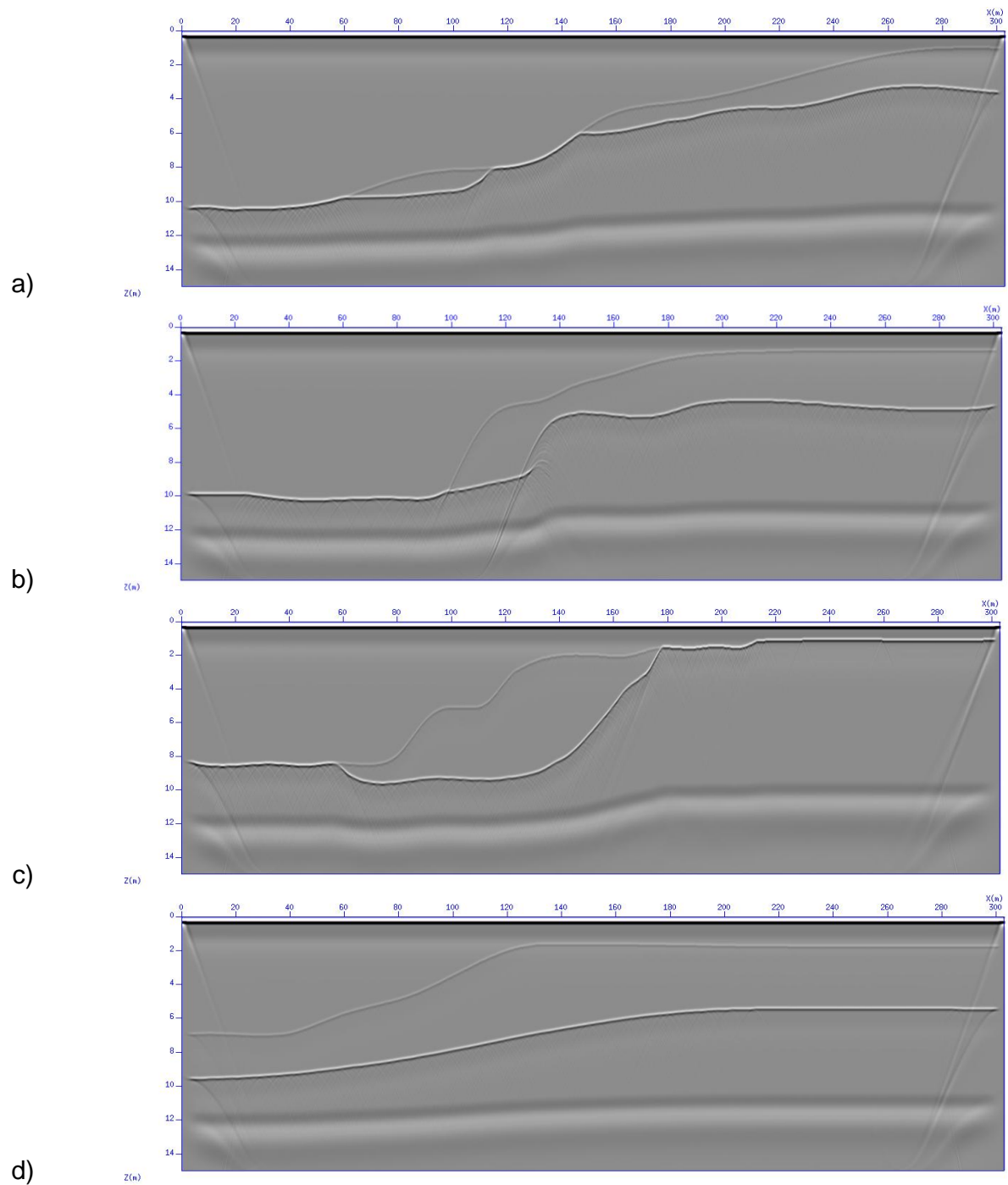


Figura 4. 5– Seções obtidas por migração Phase-Shift a) Seção C, b) Seção D, c) Seção E, d) Seção F.

Os resultados apresentados acima foram obtidos a partir de um arquivo reduzido a partir do sismograma obtido pela modelagem. Isso foi necessário visto que durante o processamento o arquivo original dobrava de tamanho em função da geração de dados complexos o que acabava por interromper a execução do programa.

Segundo a teoria da amostragem são necessárias apenas duas amostras em cada comprimento de onda para que a migração possa ser realizada corretamente. Como a frequência da fonte utilizada é de 2kHz e, como os receptores estão na superfície, será adotada a velocidade de propagação da onda na água. O comprimento de onda nesse meio é de 0,75 m. O modelo passará a ter um espaçamento de 0,25 m na direção horizontal (espaço).

Para a dimensão vertical do tempo, sabendo que o período é dado pela inversa da frequência, obtém-se 0,0005 s. Para ter dois pontos o valor deve ser dividido por 2 resultando em 0,00025 s, valor usado para o novo sismograma a ser migrado.

Dessa forma, foi criado um novo sismograma com dimensões bem inferiores às do sismograma original, com isso o tempo de processamento muito inferior, facilitando a sua execução.

Analogamente, o cálculo das áreas de solo foi realizado pelo programa AutoCad, onde as imagens eram inseridas. As áreas foram obtidas através da inserção de hachuras dentro dos limites demarcados manualmente, acrescentando ao erro do programa o erro humano ao desenhar os limites no programa de desenho técnico. Os resultados obtidos encontram-se na tabela 4.2, a seguir.

Tabela 4.2 – Área de solo nas seções em velocidade obtidas por migração por Phase-Shift

Seção	Área de solo (m <sup>2</sup> )	Erro percentual (%)
Seção A	844,15	-6,91
Seção B	563,95	-6,75
Seção C	389,08	-3,51
Seção D	803,12	-5,54
Seção E	574,52	-6,37
Seção F	1501,35	-8,59

Os erros percentuais foram calculados através da diferença do valor obtido e do valor real dividida pelo valor real de cada área de solo. É importante ressaltar que os valores dos erros possuem sinal negativo em função de a velocidade utilizada para migração (1.500 m/s) ser menor que a velocidade de propagação da onda no solo (1.600 m/s).

A utilização da migração por *Phase-shift plus interpolation* provavelmente irá reduzir os erros obtidos pelo programa utilizado para *phase-shift*, visto que a mesma considera variação horizontal de velocidade. Com isso o flanco presente na seção D, por exemplo, não mais seria um fator decisivo para determinação do erro médio.

# CAPÍTULO 5

---

## 5 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Os resultados obtidos nos diferentes métodos de migração geraram uma divergência máxima de 10%, segundo Tabelas 5.1 e 5.2 a seguir.

Tabela 5.1 – Variação da área de solo

Seção	Área de solo real (m <sup>2</sup> )	Área de solo – Raio Vertical (m <sup>2</sup> )	Área de solo - PS (m <sup>2</sup> )
Seção A	844,15	811,32	785,82
Seção B	563,95	534,23	525,86
Seção C	389,08	362,13	375,41
Seção D	803,12	694,68	758,62
Seção E	574,52	536,86	537,91
Seção F	1501,35	1409,30	1372,43

Tabela 5.2– Variação percentual da área de solo

Seção	Raio Vertical (%)	PS (%)
Seção A	-3,9	-6,91
Seção B	-5,3	-6,75
Seção C	-6,9	-3,51
Seção D	-13,5	-5,54
Seção E	-6,6	-6,37
Seção F	-6,1	-8,59

A variação máxima da área é inferior a 15%, para o método do raio vertical e inferior a 10% para migração PS.

Conforme apresentado anteriormente, os erros percentuais foram calculados através da diferença do valor obtido e do valor real dividida pelo valor real de cada área de solo. É importante ressaltar que os valores dos erros possuem sinal negativo em função de a

velocidade utilizada para migração (1.500 m/s) ser menor que a velocidade de propagação da onda no solo (1.600 m/s).

Considerando o não conhecimento dos volumes reais de solo, não é possível fazer uma análise mais precisa do resultado.

Com base no apresentado, além do ganho em tempo de execução das medições, os valores obtidos apresentam, em erro inferior a 10%. Este valor é bastante razoável considerando as resultantes obtidas por meio das metodologias tradicionais. Com isso, a utilização da sísmica rasa facilita a determinação de perfis geotécnicos em regiões submersas.

A seção que apresentou maior índice de erro foi a seção D em função dos limites entre as camadas serem menos horizontais.

Cabe ressaltar que a forma como foi calculada as áreas pelo programa AutoCad pode não ser muito precisa em função de erros humanos no traçado dos limites, caracterizando uma precisão ainda maior para os resultados obtidos. Além disso, as migrações foram realizadas a partir da velocidade de propagação das ondas na água, sem levar em consideração a velocidade de propagação da onda no solo.

# CAPÍTULO 6

---

## 6 CONCLUSÕES

A utilização de métodos sísmicos de subsuperfície, conforme apresentado no decorrer da presente dissertação, gera resultados bastante fiéis, mesmo que se deseje um resultado imediato a partir de migração com raio vertical, que pode até mesmo ser obtido em campo, para acompanhamento do perfil obtido, caso se tenha uma noção da geologia local.

Com isso, a geofísica aplicada à subsuperfície demonstra ser um método eficiente para a obtenção de perfis geotécnicos submersos com a finalidade de realizar dragagem e derrocagem.

Entretanto, para garantir que os resultados apresentados nesta dissertação sejam representativos torna-se necessário que o trabalho agora iniciado tenha continuidade e que seções com maior variabilidade de solos e geometria sejam utilizadas em modelagens.

Conforme apresentado no capítulo 5, a abordagem dessa dissertação é apenas bidimensional, ou seja, não foi efetuada a migração 3D. Torna-se necessário efetuar a migração com dados sintéticos em três dimensões para que possa ser feita uma comparação do volume de solo real do modelo de velocidades tridimensional, o volume de solo obtido a partir da modelagem em três dimensões e os valores médios utilizados na prática. Só assim será possível quantificar o erro da metodologia tradicional e da aquisição em duas dimensões tratada no presente trabalho.

A metodologia apresentada nesse trabalho permite a modelagem fiel de seções geotécnicas possibilitando comparar as áreas “reais” do solo com as obtidas com métodos da geofísica, a partir de seções geológicas conhecidas. O resultado é dado em área e são comparados conforme apresentado no capítulo anterior.

### 6.1. RESULTADOS APRESENTADOS

Um erro da ordem de 10% na área da seção transversal é significativo, entretanto em uma situação real de prospecção por sondagem, a área da seção seria obtida a partir de

interpolação dos resultados pontuais de ensaios rotativos ou de percussão, gerando ainda mais imprecisão que o método apresentado.

O capítulo 5 apresentou os resultados dos processos realizados e a comparação dos mesmos. Nota-se que os valores obtidos são muito precisos e caracterizam bem as seções geotécnicas a partir das quais foram gerados os modelos de velocidade. Basta agora verificar se em um modelo tridimensional o resultado também será adequado.

O uso de métodos tradicionais não deve ser abolido, pelo contrário, é de fundamental importância para determinação da velocidade de propagação da onda acústica nas camadas de solo. Entretanto, deve ser uma análise paralela ao método sísmico, que será responsável pela determinação da continuidade das seções (duas dimensões ou volumes (três dimensões)). Essas sondagens, entretanto, deverão ser reduzidas em quantidade e servirão como meio de certificar as condições de limite.

## **6.2. TRABALHOS FUTUROS**

Conforme apresentado no início do capítulo, o assunto ainda tem muito para ser desenvolvido, seja pela utilização de modelos de velocidade mais apurados, ou seja pela caracterização do processo realizado em três dimensões.

É interessante que os mesmos programas utilizados nas modelagens e migrações do presente trabalho sejam utilizados a partir de seções geotécnicas sintéticas mais complexas, com maior variação de solos. Assim, será possível verificar com maior precisão se os métodos são aplicáveis. Em uma etapa posterior, a metodologia deverá ser aplicada a dados reais.

O mais importante em obras de dragagem e derrocagem, entretanto, é calcular os volumes a serem removidos. Como para o cálculo de volume será realizada uma média aproximada, semelhante à utilizada pelo método tradicional, para determinar com mais exatidão o volume final e reduzir a incerteza no cálculo dos custos de obras portuárias, torna-se imprescindível o desenvolvimento de um modelo em três dimensões para verificar o erro real da metodologia.

Outro trabalho importante a ser desenvolvido é o de realizar a modelagem com a utilização da onda acústica FM e aplicação de filtros, como apresentado no capítulo 3 e como é realizado na prática.

# REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

BORDING, R. P., LINES, L. R., 1997, '*Seismic Modeling and Imaging with the Complete Wave Equations Course Notes Series*', n. 8, Society Exploration Geophysicists, Oklahoma, USA.

BULCÃO, A., 2004, "Modelagem e Migração Reversa no Tempo Empregando Operadores Elásticos e Acústicos", Tese de D.Sc., Engenharia Civil, COPPE/UFRJ – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

BUTLER, D. K., 2005, "*Near Surface Geophysics (Investigations in Geophysics, No. 13.)*", SEG – Society of Exploration Geophysicists.

CHOWNING, J. M., 1989, "*The Synthesis of Complex Audio Spectra by Means of frequency Modulation*", MIT Press.

DUARTE, O. O., 1997, "Dicionário Enciclopédico Inglês-Português de Geofísica e Geologia", 1ª Ed., Sociedade Brasileira de Geofísica, Rio de Janeiro.

FARIA, E. L., 1986, "Migração Antes do Empilhamento Utilizando Propagação Reversa no Tempo", Dissertação de M. Sc., P. P. P. G., Universidade Federal da Bahia, Salvador.

FARIA, E. L., 1993, "*Modeling, Migration and Focusing Analysis in Transversely Isotropic Media*", Ph. D. thesis, University of Texas, Austin, USA.

FERREIRA, F. J. F., 2002, "Métodos Sísmicos – Ondas, Refração e Reflexão Sísmicas", Notas de Aula da disciplina de Geofísica Aplicada, Departamento de Geologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

GAZDAG, J., 1978, "*Wave Equation Migration with the Phase-Shift Method*", Geophysics, 43, pp. 1342 – 1351.

CHOWNING, J. M., 1989, "*The Synthesis of Complex Audio Spectra by Means of Frequency Modulation*", MIT Press.



GLOAGUEN, E., “*Reconstruction des Images Bidimensionnelles de Levés de Radar Géologique em Forage*”, 2004, Tese Ph. D., Département des Génies Civil, Géologique et des Mines, École Polytechnique de Montréal, Montreal, Canadá.

LINER, C. L., 2004, “*Elements of 3D seismology*”, 2nd edition, PennWell Cooperation.

LOEWENTAL, D., WANG, G. J., JOHNSON, O. G., 1985, “*High Finite Difference Modeling and Reverse Time Migration*”, Expanded Abstract, Society of Exploration Geophysicists, Ann. Internat. Mtg., pp. 544 – 546.

MUFTI, I. R., 1990, “*Large-Scale Three-Dimensional Seismic Models and their Interpretative Significance*”, *Geophysics*, v. 55, pp. 1166 – 1182.

NETO, A. A., “Uso da Sísmica de Reflexão de Alta Resolução e da Sonografia na Exploração Mineral Submarina”, *Brazilian Journal of Geophysics*, v.18(3), pp. 241-256.

SANTOS, M. A. C., 2003, “Migração em Profundidade por Rotação de Fase dos Campos de Ondas qP e qSV em meios com simetria polar bcal”, Tese D. Sc., Departamento de Engenharia Elétrica, Pontificia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

SHARMA, P. V., 1997, “*Environmental and Engeneering Geophysics*”, *Cambridge University Press*, 475 pp.

SHERIFF, R. E., GELDART, L. P., 1995, “*Exploration Seismology*”, *Cambridge University Press*, 592 pp.

SILVA, J. J., 2007, “Ondas”, Notas de Aula da disciplina de Métodos Sísmicos, Programa de Engenharia Civil, Coppe, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

SILVA, R. P., 1995, “Uso da Migração Reversa no Tempo para Estimar Velocidades e Migrar “Turning Waves”, Dissertação de M. Sc., P. P. P. G., Universidade Federal da Bahia, Salvador.

STOLT, R. H., “*Migration by Fourier Transform*”, *Geophysics*, 43, pp. 23 – 48, 1978.

YLMAZ, Ö, 2001, "Seismic Data Analysis", Society of Exploration Geophysicists, Investigations in Geophysics n. 10.

# Livros Grátis

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

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

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

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

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