

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
INSTITUTO DE ASTRONOMIA, GEOFÍSICA E CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS

MARCUS VINICIUS APARECIDO GOMES DE LIMA

**Reflexão sísmica rasa:** estimativa de parâmetros elásticos pela inversão dos  
coeficientes de reflexão da onda P acima do ângulo crítico

São Paulo

2006

MARCUS VINICIUS APARECIDO GOMES DE LIMA

**Reflexão sísmica rasa:** estimativa de parâmetros elásticos pela inversão dos  
coeficientes de reflexão da onda P acima do ângulo crítico

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

Área de Concentração: Geofísica  
Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Liliana Alcazar Diogo

São Paulo

2006

## AGRADECIMENTOS

Expresso meus sinceros agradecimentos à:

Deus, em primeiro lugar, por me abençoar e me conceder a sabedoria, paciência e força necessárias para superar os desafios da vida.

À minha esposa, Janaina, e ao meu filho, Davi, por todo seu amor, por dar significado à minha vida e, com muita gratidão, a quem dedico este trabalho.

Aos meus pais, Célio e Geralda, e a minha irmã, Ana Lúcia, pela constante presença, carinho, apoio e incentivo, em todos os momentos principalmente nos mais difíceis.

À minha orientadora, Prof<sup>a</sup>. Liliana, por não apenas mostrar o caminho a ser seguido, mas também, por me acompanhar durante todo o seu percurso.

A todos os amigos e colegas que acompanharam o desenvolvimento deste trabalho, ajudando ou incentivando de maneira direta ou indireta.

Ao Departamento de Geofísica do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da USP que, através de seus docentes e funcionários, contribuíram para o meu crescimento e formação científica e intelectual.

A CAPES pela concessão da bolsa de mestrado e pelo apoio financeiro para realização desta pesquisa.

## RESUMO

LIMA, M. V. A. G. **Reflexão sísmica rasa:** estimativa de parâmetros elásticos pela inversão dos coeficientes de reflexão da onda P acima do ângulo crítico. 2006. 74 f. Dissertação de mestrado - Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

O objetivo deste estudo foi implementar um algoritmo de inversão para estimar as velocidades da onda cisalhante (S) assim como as densidades das camadas acima e abaixo do refletor em questão, explorando-se a informação contida nas mudanças de fase no pulso da onda compressional (P), refletida acima do ângulo crítico de incidência. Inicialmente, um estudo do comportamento da função objetivo, com dados sintéticos, foi realizado, no qual procurou-se avaliar a unicidade e a estabilidade da solução do problema inverso como, também, o efeito, sobre os valores da função objetivo, de vários aspectos envolvidos no processo de inversão. O problema proposto visa determinar quatro parâmetros, de modo que o comportamento da função objetivo foi analisado pelas seções transversais, variando dois dos parâmetros e mantendo os outros dois fixos em seus valores corretos.

As análises, usando os dados sintéticos, apresentaram resultados promissores quanto à viabilidade da metodologia proposta e permitiram identificar os fatores que, na prática, poderiam inviabilizar a convergência do processo de inversão (normalização das amplitudes e escolha da *wavelet* para o cálculo dos sismogramas). Os testes, com dados reais, não apresentaram resultados satisfatórios. Acredita-se que o principal motivo decorra do ajuste inadequado entre as *wavelets* dos dados reais e a utilizada para gerar os dados calculados, sendo, portanto, necessário investigar qual o método mais adequado para se obter um pulso mais representativo daquele dos dados reais.

**Palavras-chave:** reflexão sísmica rasa, inversão, parâmetros elásticos, coeficiente de reflexão.

## ABSTRACT

LIMA, M. V. A. G. **Shallow seismic reflection:** estimating elastic parameters from reflection coefficients inversion using P-wave post-critical. 2006. 74 f. Thesis (Master) - Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

The objective of this study was to implement an inversion algorithm in order to estimate shear wave velocities (S) as well as layer densities above and below the reflector by using information from phase changes in compressional wave pulse (P), reflected post-critical angle of incidence. At first, a study of objective function behaviour, with synthetic data, was accomplished in which (1) unicity and (2) stability of inverse problem solution as well as (3) effect of several aspects involved in the inversion process, with the objective function values, were evaluated. The proposed problem aims at determining four parameters for that objective function behaviour was analysed by transversal sections, varying just two of the four parameters, keeping the two fixed others in their correct values.

Analysis by using synthetic data presented good results related to viability of proposed methodology; these results allowed identifying factors that could disturbing the convergence of inversion process (amplitude normalization and wavelet choice to seismogram calculation). Tests with real data did not present satisfied results. Apparently the main motive of this trouble was due to inadequate adjustment between wavelet of real data with that one used to generate calculated data, being necessary to investigate which method is more adequate to obtain a more representative pulse than that one from real data.

**Key words:** shallow seismic reflection, inversion, elastic parameters, reflection coefficient.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

|   |    |
|---|----|
| <b>Figura 2.1</b> – Diagrama de fluxo do algoritmo CRS de Price.....  | 33 |
| <b>Figura 2.2</b> – Diagrama de fluxo do clássico método simplex de Nelder e Mead.....  | 34 |
| <b>Figura 2.3</b> – Diagrama de fluxo do algoritmo CRS modificado.....  | 35 |
| <b>Figura 2.4</b> – Conjunto dos possíveis novos pontos de busca calculado a partir de uma dada configuração de 6 pontos de busca: <b>a)</b> para o algoritmo CRS original, e <b>b)</b> para o CRS modificado.....  | 36 |
| <b>Figura 3.1</b> – Sismograma sintético simulando uma aquisição para análise de ruído ( <i>walkway noise test</i> ), onde a janela de afastamentos iluminada em vermelho (correspondente ao intervalo de 30 a 78 m) representa a região em que as mudanças de fase são mais evidentes; e a janela de afastamentos iluminada em azul (correspondente ao intervalo de 55 a 103 m) seria representativa de uma região em que não ocorre superposição da refração..... | 39 |
| <b>Figura 3.2</b> – Registros selecionados (janela de afastamentos iluminada em vermelho na Figura 3.2) para o cálculo da função objetivo, simulando os dados observados: <b>a)</b> sem ruído; <b>b)</b> contaminados com o ruído 1 e <b>c)</b> contaminados com o ruído 2.....   | 40 |
| <b>Figura 3.3</b> – Seções transversais da função objetivo calculadas em função das variações dos parâmetros: $\sigma_2$ , $\sigma_3$ , $\rho_2$ e $\rho_3$ , utilizando os dados sem ruído (Figura 3.3a).....  | 45 |
| <b>Figura 3.4</b> – Seções transversais da função objetivo calculadas utilizando os dados com o ruído 1 (Figura 3.3b).....  | 46 |
| <b>Figura 3.5</b> – Seções transversais da função objetivo calculadas utilizando os dados com o ruído 2 (Figura 3.3c).....  | 47 |
| <b>Figura 3.6</b> – Seções transversais da função objetivo calculadas utilizando os dados da janela de afastamentos iluminada em azul (Figura 3.2).....   | 48 |

|  |    |
|--|----|
| <b>Figura 3.7</b> – Mapas de função objetivo utilizando a normalização 1 nos sismogramas calculados e nos dados observados.....  | 49 |
| <b>Figura 3.8</b> – Mapas de função objetivo utilizando a normalização 2 nos sismogramas calculados e nos dados observados.....  | 50 |
| <b>Figura 3.9</b> – <b>a)</b> Forma do pulso utilizando $\gamma = 2$ e $f = 100$ Hz. <b>b)</b> Forma do pulso utilizando $\gamma = 3$ e $f = 90$ Hz. <b>c)</b> Espectro de amplitude da forma de pulso exibida em a). <b>d)</b> Espectro de amplitude da forma de pulso exibido em b)..... | 51 |
| <b>Figura 3.10</b> – Mapas de função objetivo com a <i>wavelet</i> alterada em relação à <i>wavelet</i> do sismograma sintético que simula os dados observados.....  | 52 |
| <b>Figura 3.11</b> – Gráfico da dispersão dos valores dos parâmetros em função do número de cálculos de função objetivo para o algoritmo CRS original utilizando dados sem ruído.....  | 57 |
| <b>Figura 3.12</b> – Gráfico da dispersão dos valores dos parâmetros em função do número de cálculos de função objetivo para o algoritmo CRS modificado utilizando dados sem ruído...57  | 57 |
| <b>Figura 3.13</b> – Gráfico da dispersão dos valores de função objetivo em função do número de cálculos de função objetivo para o algoritmo CRS original utilizando dados sem ruído.....  | 58 |
| <b>Figura 3.14</b> – Gráfico da dispersão dos valores de função objetivo em função do número de cálculos de função objetivo para o algoritmo CRS modificado utilizando dados sem ruído...58  | 58 |
| <b>Figura 3.15</b> – Gráfico da dispersão dos valores dos parâmetros em função do número de cálculos de função objetivo para o algoritmo CRS original utilizando dados contaminados com o ruído 1.....   | 59 |
| <b>Figura 3.16</b> – Gráfico da dispersão dos valores dos parâmetros em função do número de cálculos de função objetivo para o algoritmo CRS modificado utilizando dados contaminados com o ruído 1.....   | 59 |

|  |    |
|--|----|
| <b>Figura 3.17</b> – Gráfico da dispersão dos valores de função objetivo em função do número de cálculos de função objetivo para o algoritmo CRS original utilizando dados contaminados com o ruído 1.....   | 60 |
| <b>Figura 3.18</b> – Gráfico da dispersão dos valores de função objetivo em função do número de cálculos de função objetivo para o algoritmo CRS modificado utilizando dados contaminados com o ruído 1..... | 60 |
| <b>Figura 3.19</b> – Gráfico da dispersão dos valores dos parâmetros em função do número de cálculos de função objetivo para o algoritmo CRS original utilizando dados contaminados com o ruído 2.....       | 61 |
| <b>Figura 3.20</b> – Gráfico da dispersão dos valores dos parâmetros em função do número de cálculos de função objetivo para o algoritmo CRS modificado utilizando dados contaminados com o ruído 2.....     | 61 |
| <b>Figura 3.21</b> – Gráfico da dispersão dos valores de função objetivo em função do número de cálculos de função objetivo para o algoritmo CRS original utilizando dados contaminados com o ruído 2.....   | 62 |
| <b>Figura 3.22</b> – Dispersão dos valores de função objetivo em função do número de cálculos de função objetivo para o algoritmo CRS modificado utilizando dados contaminados com o ruído 2.....            | 62 |
| <b>Figura 3.23</b> – Gráfico da dispersão dos valores dos parâmetros em função do número de cálculos de função objetivo para o algoritmo CRS para a situação apresentada na Figura 3.8. ....                 | 63 |
| <b>Figura 3.24</b> – Gráfico da dispersão dos valores de função objetivo em função do número de cálculos de função objetivo para o algoritmo CRS para a situação apresentada na Figura 3.8. ....             | 63 |
| <b>Figura 3.25</b> – Localização do perfil sísmico em superfície.....  | 64 |



|  |    |
|--|----|
| <b>Figura 3.26</b> – Registros sísmicos com configuração para análise de ruído, processado com ganho AGC e filtro passa-banda.....   | 65 |
| <b>Figura 3.27</b> – Sismograma registrado com o silenciamento preservando as refrações e a reflexão do topo rochoso.....  | 66 |
| <b>Figura 3.28</b> – Sismograma registrado com o silenciamento preservando a reflexão do topo rochoso. A janela em vermelho corresponde à segunda janela de afastamentos selecionada contendo 63 traços.....   | 67 |
| <b>Figura 3.29</b> – Sismograma registrado com o silenciamento cortando parte do pulso refletido a fim de eliminar qualquer amostra correspondente à superposição da refração. A janela em vermelho corresponde à segunda janela de afastamentos selecionada contendo 63 traços..... | 68 |
| <b>Figura 3.30</b> – Gráfico da dispersão dos pontos em função do número de avaliações da função objetivo para os dados do sismograma da Figura 3.26.....  | 69 |

## LISTA DE TABELAS

|   |    |
|---|----|
| <b>Tabela 3.1</b> – Parâmetros do modelo: profundidade ( $z$ ) , velocidade da onda P ( $\alpha$ ), razão entre as velocidades da onda P e da onda S ( $\sigma$ ) e densidade ( $\rho$ )..... | 38 |
| <b>Tabela 3.2</b> – Parâmetros de aquisição utilizados para gerar o sismograma sintético.....   | 38 |
| <b>Tabela 3.3</b> – Modelo velocidade-profundidade fornecido ao algoritmo de inversão.....  | 66 |

## SUMÁRIO

|  |    |
|--|----|
| <b>1 INTRODUÇÃO</b>  | 12 |
| <b>2 METODOLOGIA DE INVERSÃO</b>                           | 14 |
| 2.1 PROBLEMA DIRETO  | 14 |
| 2.2 PROBLEMA INVERSO                                       | 23 |
| <b>2.2.1 Função objetivo</b>                               | 24 |
| <b>2.2.2 Parâmetros do modelo</b>                          | 25 |
| <b>2.2.3 Solução do problema direto</b>                    | 26 |
| <b>2.2.4 Descrição do algoritmo de busca</b>               | 26 |
| 2.2.4.1 O algoritmo CRS de Price                           | 27 |
| 2.2.4.2 O método simplex de Nelder e Mead (NMS)            | 28 |
| 2.2.4.3 O algoritmo CRS modificado                         | 30 |
| <b>3 ANÁLISE DO PROBLEMA INVERSO E DISCUSSÕES</b>          | 37 |
| 3.1 TESTES SOBRE DADOS SINTÉTICOS                          | 37 |
| <b>3.1.1 Análise do comportamento da função objetivo</b>   | 40 |
| <b>3.1.2 Resultados da inversão</b>                        | 53 |
| 3.2 TESTES COM DADO REAL                                   | 64 |
| <b>3.2.1 Área de estudo</b>                                | 64 |
| <b>3.2.2 Dados utilizados</b>                              | 65 |
| <b>3.2.3 Processamento e preparação dos dados</b>          | 65 |
| <b>3.2.4 Testes de inversão e discussão dos resultados</b> | 68 |
| <b>4 CONCLUSÕES E CONTINUIDADE DA PESQUISA</b>             | 71 |
| <b>REFERÊNCIAS</b>   | 73 |