

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**TÉCNICAS DE PROCESSAMENTO ESTOCÁSTICO DE SINAIS  
APLICADAS EM LEVANTAMENTOS  
DE REFRAÇÃO SÍSMICA PROFUNDA**

**Frederico Xavier de Melo**

**Brasília, junho de 2007**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA**

# **Livros Grátis**

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

Milhares de livros grátis para download.

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

TÉCNICAS DE PROCESSAMENTO ESTOCÁSTICO DE SINAIS  
APLICADAS EM LEVANTAMENTOS  
DE REFRAÇÃO SÍSMICA PROFUNDA

Frederico Xavier de Melo

*Manuscrito submetido ao Departamento de Engenharia  
Elétrica como requisito parcial para obtenção  
do grau de Mestre em Engenharia Elétrica*

Banca Examinadora

Prof. Geovany Araújo Borges, ENE/UnB  
*Orientador*

\_\_\_\_\_

Prof. José Eduardo Pereira Soares, IG/UnB  
*Co-orientador*

\_\_\_\_\_

Prof. George Sand Leão Araújo de França,  
SIS/UnB  
*Examinador externo*

\_\_\_\_\_

Prof. Francisco Assis de Oliveira Nascimento,  
ENE/UnB  
*Examinador interno*

\_\_\_\_\_

## **Dedicatória**

*Dedico este trabalho aos meus pais, Robério, Telma e Maria do Socorro (Tia Socorro), e minha noiva, Ana, pela compreensão, paciência e apoio incondicional.*

*Frederico Xavier de Melo*

## Agradecimentos

*Agradeço a Deus, acima de tudo, por todos os momentos proporcionados em minha vida para motivação e realização deste trabalho.*

*Aos Professores Geovany Araújo Borges e José Eduardo Pereira Soares, meus orientadores, pelo incentivo e disposição demonstrados para o desenvolvimento de novos métodos de análise em refração sísmica profunda.*

*Agradeço aos meus colegas que trabalharam no Observatório Sismológico, em especial, meus amigos Cristiano Naibert Chimpliganond, Lucas Moreira, Sidinei Tomás e Professor George Sand, pelas discussões, idéias e sugestões levantadas durante a realização da pesquisa.*

*Todos os colegas que trabalham no Instituto de Geociências, em especial àqueles que compõem o Laboratório de Sensoriamento Remoto e Laboratório para Estudo da Litosfera.*

*Frederico Xavier de Melo*

Levantamentos de refração sísmica profunda permitem obter características médias da crosta e do manto superior a partir da determinação dos alinhamentos das fases presentes nas seções sísmicas. O método utiliza o tempo de trânsito das ondas mecânicas pelo meio rochoso para extrair parâmetros como velocidade de propagação nas rochas e profundidade das descontinuidades crustais. Apesar de mundialmente empregada, a refração sísmica profunda em estudos da crosta continental encontra-se em fase embrionária no Brasil. O volume de dados utilizados e a metodologia para realização do levantamento assemelham-se às técnicas remanescentes dos anos 80 e poucas pesquisas dedicam-se exclusivamente ao estudo dos processos envolvidos nos levantamentos de refração sísmica profunda. Este trabalho busca estabelecer um método automático para caracterização inicial dos parâmetros físicos que descrevem a crosta e o manto litosférico superior a partir de registros adquiridos por levantamentos de refração sísmica profunda. A principal contribuição foca o aperfeiçoamento do processo de análise de dados, utilizando soluções automáticas no intuito de agilizar a obtenção dos primeiros parâmetros referentes à interpretação dos tempos de chegada no sismograma. Dados reais obtidos nos levantamentos de refração sísmica conduzidos na Província Tocantins foram utilizados como estudo de caso, onde pôde-se verificar as principais dificuldades e limitações do método. O algoritmo proposto mostrou-se eficiente em uma base de dados de boa qualidade com quantidade representativa de chegadas, fornecendo parâmetros condizentes com os valores determinados manualmente nos levantamentos.

---

**ABSTRACT**

Deep refraction seismic profiles allows to gather informations of average crustal parameters based on seismic sections group phases alignment. This methods relies on travel time theory to evaluate the main features of continental crust structure, such as seismic waves velocity and Moho depth. Although its widely used in developed countries, deep refraction studies are still developing in Brazil. Either the data amount and methodology to build the profile are likely the same way as used in the eighties. Minors researches projects focuses the internal process development of deep refraction studies. This work establishes a semiautomated method in order to get initial approximations of the continental crust structure from deep refraction seismic records. The main objective focuses the development of seismic data analysis procedures in order to reduce the time spent by the seismic analyst with initial phase identification. Real data set, provided by the deep refraction profile conducted on Tocantins Province, were used to evaluate the method performance as well as its mains limitations. Good results were achieved using data with good quality and uniformly distributed records, providing estimates in conformity with the real crustal characteristics.

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
1.1	OBJETIVO	1
1.2	MOTIVAÇÃO	1
1.3	REFRAÇÃO SÍSMICA	2
1.3.1	LEVANTAMENTO DE PERFIL	3
1.3.2	REFRAÇÃO SÍSMICA PROFUNDA	4
1.4	DEFINIÇÃO DO PROBLEMA	7
1.5	CONSTRUÇÃO DA BASE DE DADOS SINTÉTICOS	9
1.6	CONTRIBUIÇÕES APRESENTADAS	11
1.7	APRESENTAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	13
<b>2</b>	<b>IDENTIFICAÇÃO DA PRIMEIRA QUEBRA EM TRAÇOS DE REFRAÇÃO SÍSMICA PROFUNDA</b>	<b>15</b>
2.1	INTRODUÇÃO	15
2.2	REVISÃO SOBRE OS PRINCIPAIS ALGORITMOS DE DETECÇÃO DE FASES	16
2.2.1	ALGORITMOS BASEADOS EM ANÁLISE DA ENERGIA DOS TRAÇOS SÍSMICOS	16
2.2.2	IDENTIFICAÇÃO DE FASES UTILIZANDO MODELOS AUTOREGRESSIVOS	17
2.2.3	ALGORITMOS BASEADOS NO EMPREGO DA ESTATÍSTICA DE ALTA ORDEM	18
2.2.4	ALGORITMOS QUE UTILIZAM REDES NEURAI ARTIFICIAIS	19
2.2.5	ALGORITMOS BASEADOS EM TRANSFORMADA WAVELET DISCRETA (DWT)	19
2.3	ALGORITMO DE DETECÇÃO BASEADO NO MODELO AR DE RUÍDO PARA TRAÇOS DE REFRAÇÃO SÍSMICA PROFUNDA	20
2.3.1	TRAÇO SÍSMICO	20
2.3.2	MODELO AR DO RUÍDO SÍSMICO	20
2.3.3	FILTRO DE KALMAN	23
2.3.4	MODELO DE EVOLUÇÃO DOS COEFICIENTES DO PROCESSO AR	25
2.3.5	DETERMINAÇÃO DAS INCERTEZAS ASSOCIADAS	27
2.3.6	DETERMINAÇÃO DA PRIMEIRA QUEBRA	28
2.3.7	PÓS-PROCESSAMENTO	29
2.3.8	PROCESSO DE DETECÇÃO EM SISMOGRAMA COMPOSTO POR TRAÇOS DE REFRAÇÃO	31
2.3.9	RESUMO DO ALGORITMO DE DETECÇÃO	32
2.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	33

<b>3</b>	<b>CLASSIFICAÇÃO DO TEMPO DE TRÂNSITO DAS PRIMEIRAS QUEBRAS EM GRUPOS DE FASES <math>P_g</math> E <math>P_n</math> .....</b>	<b>34</b>
3.1	INTRODUÇÃO .....	34
3.2	REVISÃO SOBRE TÉCNICAS DE SEGMENTAÇÃO DE PONTOS.....	35
3.2.1	RASTREAMENTO DE LINHA .....	35
3.2.2	AJUSTE ITERATIVO DE PONTO.....	36
3.2.3	DETECÇÃO DE SEGMENTOS POR PROPAGAÇÃO DE COVARIÂNCIAS.....	37
3.2.4	TRANSFORMADA DE HOUGH .....	38
3.3	EXTRAÇÃO DE SEGMENTOS DE RETA DA CURVA DE TEMPO DE TRÂNSITO PELO ALGORITMO SMF.....	38
3.3.1	PARAMETRIZAÇÃO E ORGANIZAÇÃO DOS SEGMENTOS DE RETA EXTRAÍDOS ....	38
3.3.2	BASE DE EXTRAÇÃO DOS SEGMENTOS DE RETA .....	39
3.3.3	MÉTODO <i>split-and-merge fuzzy</i> PARA EXTRAÇÃO DE SEGMENTOS DE RETA ....	40
3.4	CLASSIFICAÇÃO DO GRUPO DE FASES.....	45
3.5	PROPAGAÇÃO DE INCERTEZAS DO PROCESSO.....	46
3.5.1	RESUMO DO MÉTODO PARA EXTRAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE GRUPOS DE FASES A PARTIR DO TEMPO DE TRÂNSITO .....	48
3.6	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	49
<b>4</b>	<b>DETECÇÃO DA CHEGADA DO GRUPO DE FASE PMP E CONSTRUÇÃO DE UM MODELO CRUSTAL INICIAL UNIDIMENSIONAL .....</b>	<b>50</b>
4.1	INTRODUÇÃO .....	50
4.2	REVISÃO SOBRE AS PRINCIPAIS TÉCNICAS DE DETECÇÃO DE FASES TARDIAS E CONSTRUÇÃO DE MODELOS .....	52
4.2.1	TÉCNICAS DE DETECÇÃO DE FASES TARDIAS.....	53
4.2.2	CONSTRUÇÃO DE MODELOS DE VELOCIDADE.....	55
4.3	DETECÇÃO DO GRUPO DE FASE PMP .....	57
4.3.1	CARACTERÍSTICAS DO TEMPO DE TRÂNSITO DAS FASES PMP .....	57
4.3.2	INFORMAÇÕES AUXILIARES NA DETECÇÃO DAS FASES .....	58
4.3.3	TÉCNICAS UTILIZADAS NA DETECÇÃO.....	59
4.4	CONSTRUÇÃO DO MODELO DE VELOCIDADE.....	64
4.4.1	VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO NO MANTO SUPERIOR .....	64
4.4.2	VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO E PROFUNDIDADE DA CROSTA.....	66
4.4.3	RESUMO DO ALGORITMO .....	71
4.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	72
<b>5</b>	<b>RESULTADOS EXPERIMENTAIS .....</b>	<b>73</b>
5.1	INTRODUÇÃO .....	73
5.2	CONSTRUÇÃO DO MODELO DE VELOCIDADE UTILIZANDO DADOS SINTÉTICOS ..	75
5.2.1	DETECÇÃO DAS PRIMEIRAS CHEGADAS.....	75
5.2.2	EXTRAÇÃO DE SEGMENTOS DE RETA E CLASSIFICAÇÃO EM GRUPOS DE FASE ..	78
5.2.3	DETECÇÃO DA PMP.....	81
5.2.4	ESTIMAÇÃO DA VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO NO MANTO SUPERIOR - $v_m$ .....	83

5.2.5	ESTIMAÇÃO DA VELOCIDADE E ESPESSURA MÉDIA DA CROSTA CONTINENTAL - $\Theta = (v_c, h_c)^T$ .....	84
5.2.6	CONSTRUÇÃO DO MODELO DE VELOCIDADES .....	85
5.3	REGISTROS DE REFRAÇÃO SÍSMICA DA PROVÍNCIA TOCANTINS .....	88
5.3.1	LINHA SÍSMICA DE PORANGATU .....	92
5.3.2	LINHA SÍSMICA DE CAVALCANTE.....	101
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>108</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>112</b>
	<b>ANEXOS.....</b>	<b>117</b>
<b>I</b>	<b>TABELAS E FIGURAS</b>	
	<b>CONSTRUÇÃO DOS MODELOS DE VELOCIDADE</b>	
	<b>LEVANTAMENTOS DE REFRAÇÃO SÍSMICA PROFUNDA .....</b>	<b>118</b>
I.1	LINHA DE PORANGATU .....	118
I.2	LINHA DE CAVALCANTE.....	124
<b>II</b>	<b>CÓDIGO MATLAB.....</b>	<b>130</b>
II.1	PRINCIPAL.M .....	131
II.2	SISMOG.M.....	138
II.3	RSAC.M .....	139
II.4	LH.M .....	141
II.5	DETECCAO_KF.M .....	147
II.6	KF .....	148
II.7	EXTR_CLASSP.M.....	151
II.8	SMFZ_06.M .....	153
II.9	MQPHBR.M .....	157
II.10	PROP_INC.M .....	158
II.11	PROPAGACAO_UTFR.M .....	160
II.12	MV_PRIORI.M .....	161
II.13	PROPAGACAO_UTFR_2.M .....	165
II.14	SIR.M .....	166

# LISTA DE FIGURAS

1.1	Exemplo de uma seção com uma interface inclinada. Os pontos A, C, E e G correspondem aos pontos dos tiros, enquanto as regiões em B, D e F mostram o traçado de raio por refração sísmica entre os tiros. Para que ocorra essa situação, a velocidade de propagação do meio inferior (azul) deve ser maior do que o meio superior (verde).....	3
1.2	Sismograma composto das ondas P do tiro 4 da linha de refração sísmica profunda de Porangatu. As linhas pontilhadas em vermelho indicam os grupos de fase identificadas por meio de análise manual dos traços. Fonte: [Soares 2005].....	4
1.3	Distribuição mundial de mais de 5000 levantamentos de sísmica de refração e reflexão, e função do receptor. Os triângulos vermelhos correspondem à localização de dados continentais e os azuis, de oceânicos. Fonte: [Christensen e Mooney 1995] ..	5
1.4	Distribuição de profundidades crustais no Brasil e em regiões adjacentes calculada a partir de levantamentos brasileiros de sísmica de reflexão e refração (quadrados), função do receptor (círculos) e de valores provenientes do modelo de espessuras mundial. As linhas tracejadas indicam a localização dos levantamentos de refração sísmica profunda no Brasil: (1) Giese & Schuttle 1980; (2) Perosi 2000; (3) Soares 2005 e Perosi 2006. Fonte: [Ventura 2006]. ..	7
1.5	Tempo de trânsito com o traçado de raios para os grupos de fase Pg e Pn. Note que a Pg é mascarada pela chegada da Pn antes mesmo de propagar-se no meio da crosta. ....	8
1.6	Tempo de trânsito com o traçado de raios para os grupos de fase Pg, Pc e Pn. Caso a divisão entre crosta superior e inferior ocorra no meio de sua estrutura, a refração entre elas ainda aparece como primeira quebra. ....	8
1.7	Tempo de trânsito com o traçado de raios para os grupos de fase Pg, Pc e Pn, com a divisão entre crosta e manto a 25 km de profundidade. Note que a chegada da fase Pc é posterior à das fases Pg e Pn.....	9
1.8	Modelo de estrutura crustal utilizado para gerar a base de dados sintéticos. Neste modelo a Moho é uma interface plana a 38 km de profundidade, os materiais da crosta e do manto superior são homogêneos, e os tiros são realizados nas extremidade da linha sísmica. Na crosta a velocidade de propagação possui variação constante e positiva de 6,2 a 6,8 km/s da superfície para base. A velocidade de propagação no manto superior varia de 7,9 a 8,1 km/s. ....	10
1.9	Forma de onda proveniente da manipulação dos parâmetros livres da Tabela 1.2 para função de geração de fonte sísmica. ....	12

1.10	Diagrama em blocos dos processos utilizados para construção do modelo de velocidades a partir do sismograma composto de levantamentos de refração sísmica.....	13
2.1	Diagrama em blocos simplificado do processo de detecção de fases de um evento sísmico. O dado analógico é discretizado no bloco Aquisição do Sinal e condicionado no bloco Tratamento dos Sinais. O processo de Detecção da Fase é aplicado ao dado transformado de forma a encontrar o instante de chegada do evento sísmico. ....	16
2.2	Sismograma sintético gerado a partir da junção de traços espacialmente distantes de uma fonte controlada na origem (0 km) para modelo de uma camada. Cada traço é representado com uma série discreta, e o evento sísmico ocorre em determinado instante $z_e$ . Para facilitar a visualização, a seção foi reduzida em 7.0 km/s.....	21
2.3	Resíduos do modelo AR de quarta ordem para região do traço sísmico em (A). O histograma feita da janela (1), onde não existe evento sísmico, mostra o histograma em forma de sino. O histograma da janela com evento (2), mostra uma concentração de pontos no centro do gráfico (C). ....	22
2.4	Diagrama em blocos que mostra o funcionamento do laço de estimação do filtro de Kalman. Com base nos parâmetros iniciais $\hat{\mathbf{x}}[0], \mathbf{P}[0], \mathbf{Q}[0], e R[0]$ , o sistema inicia o processo recursivo, dependente somente das relações de transformações e amostras passadas. Fonte: [Brown e Hwang 1997].....	25
2.5	Diagrama em blocos de atuação do filtro de Kalman para problemas de estimação recursiva. O termo de inovação $\epsilon$ é utilizado para avaliar as diferenças entre o valor real e o estimado pelo filtro. ....	26
2.6	Traço sísmico (A) contaminado por variações espúrias de alta concentração espectral ( <i>spikes</i> ). Note que a ocorrência dos <i>spikes</i> alteram o processo de identificação, refletindo no valor da distância de Mahalanobis (B). ....	30
2.7	Detalhe do comportamento do algoritmo de detecção para sismogramas compostos da refração sísmica. A amostra de início da detecção de um traço no sismograma é definida pela detecção ocorrida no traço anterior, sem a necessidade de realizar o processo de identificação desde a amostra zero.....	31
3.1	Sismograma sintético com os grupos de fase Pg e Pn, referentes às primeiras quebras, identificados. ....	35
3.2	Exemplo gráfico dos métodos de extração de segmentos por Rastreamento de Linha (A) e Ajuste Iterativo de Pontos (B). (Fonte: [Borges e Aldon 2000]) .....	36
3.3	Exemplo gráfico do método de extração de segmentos por propagação de covariâncias. (Fonte: [Ji Qiang & Haralick 1998]) .....	37
3.4	Exemplo de extração realizada pelo SMF em uma curva fictícia de tempo de trânsito. A base de dados $\mathcal{Z} = (x_i, t_i)^T$ é representada pelos símbolos em "X". Os traços pontilhados apontam os segmentos extraídos pelo SMF, com índice de dispersão máximo $\delta_{max} = 11$ .....	45

4.1	Diagrama ( $z/x \times vt/x$ ) que mostra a discrepância entre a determinação da profundidade da crosta. Note que para pequenas distâncias $x$ , as fases Pg/Pn fornecem informações próximas às dos valores reais. Para maiores profundidades, no entanto, o erro é considerável. Fonte: [Giese 1976].	51
4.2	Traços das fases diretas e refratadas, representadas como frentes progressivas, e fase refletida, representada como frente regressivas [Giese 1976].	52
4.3	Sismograma composto sintético destacando a chegada do grupo de fase PmP (em preto). O ponto de maior amplitude da PmP é o ponto de reflexão crítico e representa o ponto de início da refração na Moho.	57
4.4	Percentual de energia refletida de uma frente de onda para diversas razões de densidade. $\alpha_1/\alpha_2 = 1,5$ e $\sigma_1 = \sigma_2 = 0,25$ . Fonte: [Geldar 1995]	58
4.5	Utilização do segmento do grupo de fase Pn como ponto inicial na identificação do tempo de chegada da PmP. A extrapolação do segmento é representada pelos pontos vermelhos.	59
4.6	Método de busca pelo valor máximo da amplitude no intervalo do traço. A linha pontilhada em vermelho aponta qual o valor máximo encontrado no segmento e o determina como ponto de chegada da PmP.	60
4.7	Método de busca pela janela com maior energia. O vetor de energia é obtido da equação 4.1. A chegada da fase PmP estará no valor máximo do vetor $E(i)$	61
4.8	Deteção por Estatística de Alta Ordem. O parâmetro <i>skewness</i> verifica as condições de simetria da distribuição do traço sísmico e o <i>kurtosis</i> avalia sua curtose. Caso esse valores sejam nulos, a seqüência é Gaussiana. A não gaussianidade é verificada ser os valores das estimativas deixarem de ser nulos.	63
4.9	Traçado de raio sintético mostrando os prováveis caminhos de propagação da fase Pn.	65
4.10	Traçado de raio sintético com os possíveis caminhos de propagação da fase PmP.	67
4.11	Diagrama em blocos do algoritmo para construção do modelo de velocidades.	71
5.1	Adição de ruído de fundo ao traço sintético. O traço em (A) representa a forma de onda gerada para uma fases. A adição de uma seqüência Gaussiana, com média zero e variância de 5% do valor máximo do traço resulta na forma de onda (B).	75
5.2	Resultado da detecção de primeiras quebras nos sismogramas sintéticos para os tiros direto e reverso. As estrelas representam a posição dos tiros no perfil. Os pontos em vermelho indicam o tempo de chegada detectado pelo algoritmo. Os traços foram gerados com um período de amostragem $T_{acq} = 0,02$ segundos. Para facilitar visualização, os perfis foram reduzidos em 7 km/s.	76
5.3	Detalhe do processo de detecção de um determinado traço do sismograma. A linha em vermelho representa o tempo de chegada identificado, enquanto a linha preta mostra o tempo em que o SEIS88 iniciou a geração da fase do traço (A). A distância de Mahalanobis foi calculada durante o instante de identificação. A linha horizontal tracejada mostra o limiar do teste estatístico de 3,84.	78

5.4	Comportamento dos coeficientes AR e no seu intervalo de confiança. O traço sísmico com a chegada identificada é mostrado em (A). Os coeficientes AR de ordem 2 estão representados em (B) e (C). Os traços em vermelho representam a evolução temporal da matriz de covariância $\mathbf{P}[k]$ . Note a alteração no comportamento dos coeficientes AR e na matriz no instante de ocorrência e logo após a chegada da fase. ....	78
5.5	Resultado da extração de retas para os perfis direto (A) e reverso (B). Os segmentos numerados de 1 a 8 no perfil direto, e 1 a 7 no reverso, foram extraídos no método SMF. Em ambos os perfis, $\delta_{max} = 11$ e redução de velocidade de 7 km/s. ....	79
5.6	Resultado da classificação dos segmentos SMF em grupos de fase Pg e Pn. As linhas tracejadas em vermelho representam as fases Pg. A chegada da Pn é representada pela linha sólida em vermelho. As elipses ao redor dos segmentos representam o intervalo de confiança calculado por meio da propagação de incertezas. As linhas tracejadas em cinza representam o traço sísmico, mostrado com redução de 7 km/s. .	82
5.7	Resultado da função de verossimilhança $p(t_{PmP} \Theta)$ baseado na grade de busca para os tiros direto e reverso. A grade gerada compreende os valores globais levantados por [Christensen e Mooney 1995] para velocidades e espessuras média da crosta. Como o modelo sintético gerado é uniforme, as funções de verossimilhança são idênticas. Para ambos os casos $\sigma_w^2 = 0,05 s^2$ .....	85
5.8	Função de densidade de probabilidade conjunta $p(\Theta t_{PmP})$ gerada pelo método SIR. Foram geradas 10.000 amostras para os tiros direto e reverso. A elipse de incerteza 3-sigma está em vermelho e abrange 98,89 % das amostras geradas. ....	86
5.9	Resultado final do algoritmo de detecção das fases Pg, Pn e PmP e estimação dos parâmetros médio da crosta continental para uma base sintética de registros sísmicos. As detecções de fase são representadas graficamente pelos pontos em vermelho (A) e (C). Os modelos de velocidade real (azul) e estimado (vermelho) são mostrados em (B) e (D) para os perfis direto e reverso. ....	87
5.10	Mapa geológico da Província Tocantins. No sentido leste-oeste, são mostrados o Cráton do São Francisco, a Faixa Brasília (dividida em zona externa, Maciço do Goiás e Arco Magmático de Goiás), e a Faixa Araguaia. Os levantamentos de refração sísmica profunda de Cavalcante e Porangatu são mostrados no mapa. Os pontos em cruz (X) representam as estações de registro de dados e as estrelas ilustram as posições dos tiros efetuados. ....	89

5.11	Modelo em duas dimensões da crosta e do manto superior obtidos por modelagem direta de traçado de raio a partir dos levantamentos de refração sísmica profunda de Cavalcante e Porangatu e da função do receptor. O perfil topográfico é mostrado em conjunto com o modelo. As subdivisões sísmicas foram fundamentadas pelo comportamento da Moho, arquitetura da crosta, variações na velocidade média de propagação da onda P na crosta e sua relação com as ondas S ( $V_p / V_s$ ). A descontinuidade na região de Minaçu foi identificada por mudanças na velocidade do manto superior, na arquitetura da crosta, na profundidade da Moho, e no comportamento do perfil topográfico. As anomalias locais na crosta superior são identificadas de oeste para leste como corpo anortósico (cinza), granito Serra Dourada (área em cruz), e o complexo máfico-ultramáfico camadado de Cana Brava (negro). Os triângulos invertidos indicam a posição do arranjo sismográfico instalado em Cavalcante e as barras sobre ele mostram a profundidade da Moho obtida por função do receptor. Fonte: [Soares et al. 2006].	91
5.12	Sismograma composto do tiro direto obtido a partir do levantamento de refração sísmica profunda realizado em Porangatu. Para restringir o espectro de frequências e eliminar informações que possam atrapalhar o processo de estimação, os traços na forma bruta (A) foram filtrados por um filtro passa-banda (B) com frequência de corte entre 2 e 10 Hz. O período de amostragem dos registros é de $T_{acq} = 0,007$ segundos, e o sismograma foi reduzido em 7 km/s.	93
5.13	Sismograma composto do tiro reverso obtido a partir do levantamento de refração sísmica profunda realizado em Porangatu. Para restringir o espectro de frequências e eliminar informações que possam atrapalhar o processo de estimação, os traços na forma bruta (A) foram filtrados por um filtro passa-banda (B) com frequência de corte entre 2 e 10 Hz. O período de amostragem dos registros é de $T_{acq} = 0,007$ segundos, e o sismograma foi reduzido em 7 km/s.	94
5.14	Traçado de raio para as fases Pn (A) e PmP (B) no tiro direto do levantamento de Porangatu. O modelo em duas dimensões proposto mostra o comportamento de propagação de ambas as fases na zona de transição entre a Faixa Araguaia e o Arco Magmático de Goiás. Fonte: [Soares 2005].	95
5.15	Traçado de raio para as fases Pn (A) e PmP (B) no tiro reverso do levantamento de Porangatu. O modelo em duas dimensões proposto mostra o comportamento de propagação das fases na zona de transição entre a Faixa Araguaia e o Arco Magmático de Goiás. Fonte: [Soares 2005].	98
5.16	Resultado final do algoritmo de detecção das fases Pg, Pn e PmP e estimação dos parâmetros médio da crosta continental para levantamento de refração sísmica profunda de Porangatu. As detecções de fase são representadas graficamente pelos pontos em vermelho (detectados) e verdes (modelados) nas seções (A) e (C). Os modelos de velocidade real (azul) e estimado (vermelho) são mostrados em (B) e (D) para os perfis direto e reverso.	100

5.17	Sismograma composto do tiro direto obtido a partir do levantamento de refração sísmica profunda realizado em Cavalcante. Para restringir o espectro de frequências e eliminar informações que possam atrapalhar o processo de estimação, os traços na forma bruta (A) foram filtrados por um filtro passa-banda (B) com frequência de corte entre 2 e 10 Hz. O período de amostragem dos registros é de $T_{acq} = 0,007$ segundos, e o sismograma foi reduzido em 7 km/s. ....	102
5.18	Sismograma composto do tiro reverso obtido a partir do levantamento de refração sísmica profunda realizado em Cavalcante. Para restringir o espectro de frequências e eliminar informações que possam atrapalhar o processo de estimação, os traços na forma bruta (A) foram filtrados por um filtro passa-banda (B) com frequência de corte entre 2 e 10 Hz. O período de amostragem dos registros é de $T_{acq} = 0,007$ segundos, e o sismograma foi reduzido em 7 km/s. ....	103
5.19	Resultado final do algoritmo de detecção das fases Pg, Pn e PmP e estimação dos parâmetros médio da crosta continental para levantamento de refração sísmica profunda de Cavalcante. As detecções de fase são representadas graficamente pelos pontos em vermelho nas seções (A) e (C). Os pontos em verde representam a chegada modelada pelos parâmetros da crosta na construção da PmP. Os modelos de velocidade real (azul) e estimado (vermelho) são mostrados em (B) e (D) para os perfis direto e reverso. ....	107
I.1	Extração de retas por SMF para os perfis direto (A) e reverso (B) no levantamento de Porangatu. Os segmentos (linhas em vermelho) foram numerados de 1 a 4 no perfil direto, e 1 a 8 no reverso. Para ambos os tiros, o parâmetro de dispersão utilizado foi de $\delta_{max} = 15$ . O sismograma foi reduzido em 7 km/s. ....	120
I.2	Resultado da classificação dos segmentos em grupos de fase Pg e Pn nos tiros direto (A) e reverso (B) do levantamento de Porangatu. As linhas tracejadas em vermelho representam as fases Pg. A chegada da Pn é representada pela linha sólida em vermelho. As elipses ao redor dos segmentos representam os intervalos de confiança calculado por propagação de incertezas. As linhas tracejadas em cinza representam o traço sísmico, reduzido em 7 km/s. ....	121
I.3	Processo de estimação da velocidade de propagação e espessura média da crosta no tiro direto do levantamento de Porangatu. Todo método consiste na (A) detecção dos prováveis tempos de chegada da PmP, (B) estimação inicial por meio de estimação dos parâmetros pelo máximo da verossimilhança, (C) correção da discretização utilizando SIR, e (D) com os parâmetros estimados, estabelecer no sismograma o comportamento espacial da PmP. ....	122
I.4	Processo de estimação da velocidade de propagação e espessura média da crosta no tiro reverso do levantamento de Porangatu. Todo método consiste na (A) detecção dos prováveis tempos de chegada da PmP, (B) estimação inicial por meio de estimação dos parâmetros pelo máximo da verossimilhança, (C) correção da discretização utilizando SIR, e (D) com os parâmetros estimados, estabelecer no sismograma o comportamento espacial da PmP. ....	123

I.5	Extração de retas por SMF para os perfis direto (A) e reverso (B) no levantamento de Cavalcante. Os segmentos (linhas em vermelho) foram numerados de 1 a 7 no perfil direto, e 1 a 4 no reverso. O parâmetro de dispersão utilizado no tiro direto foi $\delta_{max} = 15$ , e $\delta_{max} = 30$ no tiro reverso. O sismograma foi reduzido em 7 km/s. ...	126
I.6	Resultado da classificação dos segmentos em grupos de fase Pg e Pn nos tiros direto (A) e reverso (B) do levantamento de Cavalcante. As linhas tracejadas em vermelho representam as fases Pg. A chegada da Pn é representada pela linha sólida em vermelho. As elipses ao redor dos segmentos representam os intervalos de confiança calculado por propagação de incertezas. As linhas tracejadas em cinza representam o traço sísmico, reduzido em 7 km/s.....	127
I.7	Processo de estimação da velocidade de propagação e espessura média da crosta no tiro direto do levantamento de Cavalcante. Todo método consiste na (A) detecção dos prováveis tempos de chegada da PmP, (B) estimação inicial por meio de estimação dos parâmetros pelo máximo da verossimilhança, (C) correção da discretização utilizando SIR, e (D) com os parâmetros estimados, estabelecer no sismograma o comportamento espacial da PmP.....	128
I.8	Processo de estimação da velocidade de propagação e espessura média da crosta no tiro reverso do levantamento de Cavalcante. Todo método consiste na (A) detecção dos prováveis tempos de chegada da PmP, (B) estimação inicial por meio de estimação dos parâmetros pelo máximo da verossimilhança, (C) correção da discretização utilizando SIR, e (D) com os parâmetros estimados, estabelecer no sismograma o comportamento espacial da PmP.....	129
II.1	Diagrama em forma de árvore que mostra a organização do código MATLAB. Cada subdiretório possui um número de chave, e somente pode-se acessar suas áreas para consulta aberta da área. ....	130

# LISTA DE TABELAS

1.1	Espessura e Velocidades crustais para Cinco Províncias Tectônicas e Crosta Continental Média. Fonte: [Christensen e Mooney 1995].....	6
1.2	Parâmetros adotados para o modelo da Figura 1.8. ....	10
1.3	Parâmetros livres da função de fonte sísmica (Equação 1.1), adotados para geração do sismograma sintético. ....	11
5.1	Parâmetros iniciais utilizados no algoritmo de detecção por filtragem recursiva. Os valores $q_{11} \dots q_{44}$ são relativos à diagonal principal da matriz de incerteza do modelo <b>Q</b> . ....	76
5.2	Resultado da detecção das fases para os registros sintéticos. Os valores em destaque ( $t_{kf}$ ) representam os tempos de chegada detectados pelo algoritmo. ....	77
5.3	Resultado do processo de extração de segmentos por SMF nos dados sintéticos. Os valores nos campos indicam os parâmetros relativos às coordenadas polares $(\rho, \alpha)$ , os pontos de suporte $(x, t)^T$ , e o peso de similaridade em cada ponto. O valor em $x$ representa a distância em relação ao ponto de tiro. ....	80
5.4	Grupos de fase Pg e Pn classificados pela investigação do coeficiente angular dos segmentos resultantes do SMF. O erro dos parâmetros polares $(\rho, \alpha)^T$ foi determinado por propagação dos pesos exercidos em cada ponto para formação do segmento. ....	81
5.5	Tempos iniciais para detecção da PmP em traços localizados próximos à zona do ponto crítico. Os tempos foram determinados por meio da extrapolação do segmento de reta correspondente à fase Pn. ....	81
5.6	Resultado da detecção da PmP para as técnicas de Máxima Amplitude ( $t_{ma}$ ), Máxima Energia ( $t_{me}$ ), <i>Skewness</i> ( $t_{sk}$ ) e <i>Kurtosis</i> ( $t_{kt}$ ). Nos dois perfis, os valores em negrito representam o tempo detectado com menor resíduo em comparação com o tempo de chegada real ( $t_r$ ). ....	83
5.7	Velocidade de propagação do manto superior $\hat{v}_m$ estimada a partir do inverso do coeficiente angular do segmento de reta da refração na Moho. A tabela mostra a velocidade estimada em comparação com a velocidade real estipulada para o meio para ambos os perfis. ....	84
5.8	Resultado da estimação dos parâmetros de velocidade e espessura média da crosta. As estimativas iniciais foram obtidas pelo máximo da verossimilhança (MV). O ajuste do resultado da MV foi feito pelo método <i>Sampling Importance Resampling</i> (SIR). ....	85

5.9	Resultado final da estimação da velocidade de propagação e espessura média crustal $v_c$ e $h_c$ , e velocidade de propagação no manto superior $v_m$ . Todos os valores estimados são comparados com os parâmetros definidos para construção do sismograma sintético. ....	86
5.10	Parâmetros médios da estrutura da crosta continental obtidos por [Soares et al. 2006] para os tiros 1 e 7 nos levantamentos de Porangatu e Cavalcante. A velocidade média da crosta é representada por $v_c$ , a espessura média por $h_c$ e $v_m$ é a velocidade do manto. ....	92
5.11	Resultado final da estimação da velocidade de propagação média da crosta $v_c$ , espessura média crustal $h_c$ , e velocidade de propagação no manto superior $v_m$ sob a linha de Porangatu. A comparação dos valores estimados é feita com referência no modelamento realizado por [Soares et al. 2006]. ....	97
5.12	Resultado final da estimação da velocidade de propagação média da crosta $v_c$ , espessura média crustal $h_c$ , e velocidade de propagação no manto superior $v_m$ sob a linha de Cavalcante. A comparação dos valores estimados é feita com referência no modelamento realizado por [Soares et al. 2006]. ....	105
I.1	Resultado da detecção das fases nos 68 registros do perfil direto e 56 do reverso para a linha sísmica de Porangatu. O tempo de chegada apontado pelo algoritmo $t_{kf}$ é destacado em negrito. ....	118
I.2	Resultado da detecção das fases para os registros do levantamento direto e reverso de Cavalcante. Os valores em destaque ( $t_{kf}$ ) representam os tempos de chegada detectados pelo algoritmo. ....	124

# LISTA DE SIMBOLOS

## Símbolos Latinos

$\mathbf{C}$	Matriz de covariância	
$f$	Frequência	[Hz]
$h$	Espessura	[km]
$T, t$	Tempo	[seg]
$V, v$	Velocidade de propagação de onda mecânica	[km/s]
$Z, z$	Valor da amostra de um determinado registro	[counts]
$\mathbf{Z}$	Distribuição dos pontos na curva de tempo de trânsito	[km, s]

## Símbolos Gregos

$\alpha$	Representação do ângulo em coordenadas polares	[rad]
$\gamma$	Índice de abertura da função seno (Gaussiana)	
$\psi$	Varição em fase	[seg]
$\rho$	Representação do raio em coordenadas polares	[km]
$\Theta$	Vetor de parâmetros	[km/s km]

## Grupos Adimensionais

$L$	Lista de segmentos de reta
-----	----------------------------

## Subscritos

$acq$	Relativo à taxa de aquisição de dados
$c$	crosta
$d$	dispersão dos pontos
$m$	manto superior
$k$	segmento de reta
$p$	onda primária, compressional

## Sobrescritos

$\cdot$	Variação temporal
$\hat{\phantom{x}}$	Estimativa
$\bar{\phantom{x}}$	Média
$m$	Ordem de processo

## Siglas

AR	Processo Autoregressivo
HOS	<i>High Order Statistics</i>
i.i.d.	Seqüência independente e identicamente distribuída
Moho	Descontinuidade de Mohorovičić
MV	Máximo da Verossimilhança
$P_g$	Onda Primária Direta
$P_c$	Onda Primária Refratada na Crosta Inferior
$P_n$	Onda Primária Refratada na Moho
$PmP$	Onda Primária Refletida na Moho
SAC	<i>Seismic Analysis Code</i>
SIR	<i>Sampling Importance Resampling</i>
SMF	<i>Split-and-Merge Fuzzy</i>

# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 Objetivo

O trabalho busca estabelecer uma metodologia automática para caracterização inicial dos parâmetros físicos que descrevem a crosta e o manto litosférico superior, dado os registros adquiridos por levantamentos de refração sísmica profunda. Valendo-se de técnicas de processamento de sinais aplicados à detecção de tempos de chegada, extração e classificação de retas, e estimação não linear, um sismograma composto é utilizado para determinar as velocidades de propagação na crosta e no manto superior, bem como a profundidade da descontinuidade de Mohorovičić (Moho).

Cada método é empregado de forma seqüencial, onde cada um desempenha uma função específica para transformar as informações de entrada, sob a forma de um registro sísmico, em informações físicas de velocidade e profundidade para construção do modelo de velocidade.

O trabalho visa contribuir para o aperfeiçoamento do processo de análise de dados, empregando soluções automáticas afim de agilizar a obtenção dos primeiros parâmetros referentes à interpretação dos tempos de chegada no sismograma. Com isso, pretende-se criar um modelo inicial para que o analista de dados guie-se na caracterização dos detalhes sobre a estrutura crustal, ou para servir como parâmetro de entrada em técnicas que utilizam modelagem inversa do espaço de dados.

A validação do método é determinada por meio de sismogramas sintéticos com parâmetros médios crustais definidos *a priori*. Dados reais provenientes de levantamentos de refração sísmica conduzidos na Província Tocantins, foram utilizados como estudo de caso para avaliar e apontar as dificuldades e limitações na implementação do método. O algoritmo proposto mostra-se eficiente em uma base de dados de boa qualidade e quantidade representativa de chegadas, fornecendo parâmetros condizentes com os valores determinados pelos levantamentos.

### 1.2 Motivação

Apesar de largamente empregada no mundo todo nos últimos cinquenta anos, a utilização da refração sísmica profunda para estudar a crosta continental encontra-se em fase embrionária no Brasil [Christensen e Mooney 1995]. O volume de dados utilizados e a metodologia para realização

do levantamento, assemelham-se às técnicas remanescentes dos anos 80, coincidentemente com o início da digitalização dos dados sísmicos.

Poucas pesquisas dedicam-se exclusivamente ao estudo dos processos envolvidos nos levantamentos de refração sísmica profunda. Apesar de assemelhar-se à outros métodos, como reflexão sísmica e sismologia observacional [Geldar 1995], características próprias da refração sísmica, como estrutura física para realização dos experimentos e otimização da análise dos dados, são pouco discutidas. Se tomarmos como exemplo a interpretação dos dados, o processo na refração é, em sua maioria, realizado manualmente, diferentemente da reflexão sísmica, onde sua relevância na exploração de hidrocarbonetos, a torna tecnologicamente mais avançada.

Existe a necessidade do comprometimento de mais pesquisas no Brasil voltadas aos processos utilizados nos experimentos de refração sísmica para o estudo da crosta continental brasileira. A integração de diversas áreas de conhecimento, possibilitaria o desenvolvimento das técnicas empregadas atualmente, melhorando a qualidade dos dados adquiridos e diminuindo o tempo empregado em sua análise.

Partindo dessas premissas, o trabalho desenvolvido pretende contribuir no aperfeiçoamento dos processos de análise preliminar dos dados de refração. A partir da estimação de parâmetros básicos para construção do modelo de velocidade, é proposta a semi-automação das técnicas, antes manualmente empregadas no estudo da crosta.

### 1.3 Refração sísmica

O método da refração sísmica utiliza o tempo de propagação das ondas mecânicas no meio rochoso para extrair parâmetros, como velocidade de propagação e profundidade das descontinuidades na subsuperfície. As descontinuidades são caracterizadas por variações abruptas na velocidade e/ou densidade. A geração das frentes de ondas mecânicas é realizada de forma controlada ( explosão química, tiro de espingarda, marretas, entre outros). Os levantamentos de refração obtêm as características dos meios na subsuperfície a partir da determinação dos alinhamentos das fases presentes nas seções sísmicas, que representam as frentes de onda direta, refletida de alto ângulo e refratada. As seções fornecem o tempo de trânsito das fases em diversos pontos localizados espacialmente em relação à fonte. Sua extensão deve ser de sete a dez vezes maior do que a descontinuidade mais profunda a qual deseja-se mapear.

Os primeiros experimentos envolvendo sísmica de refração e reflexão foram realizados durante a Primeira Grande Guerra, quando estudaram-se as propriedades sísmicas na construção de equipamentos de localização da artilharia inimiga [McGee 1967]. Desde então, difundiu-se a idéia da utilização de energia sísmica para mapear estruturas geológicas. Os primeiros trabalhos para esse fim foram realizados em 1922, juntamente com os primeiros experimentos de refração. O primeiro trabalho comercial envolvendo refração foi em 1924, no México, para identificar um reservatório de petróleo, formado por um sistema de falhas em calcário [McGee 1967]. Os primeiros registros da refração envolvendo o mapeamento de estruturas em subsuperfície datam de 1934. Em 1939, o método foi aprimorado pelo uso de tiros de refração e observação do tempo de atraso na chegada das frentes de onda.

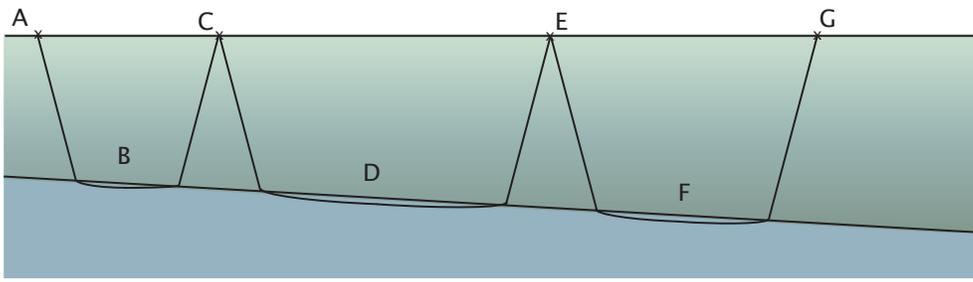


Figura 1.1: Exemplo de uma seção com uma interface inclinada. Os pontos A, C, E e G correspondem aos pontos dos tiros, enquanto as regiões em B, D e F mostram o traçado de raio por refração sísmica entre os tiros. Para que ocorra essa situação, a velocidade de propagação do meio inferior (azul) deve ser maior do que o meio superior (verde).

Apesar de semelhantes, a refração distingue-se da reflexão sísmica principalmente nas distâncias fonte-sensores empregadas em cada método. Técnicas de refração utilizam distâncias maiores para observação do tempo de trânsito. Como consequência, a fonte geradora das ondas mecânicas deve ser mais potente do que as utilizadas na reflexão. A refração destaca-se da reflexão por apresentar melhores estimativas da velocidade de propagação das ondas sísmicas e a profundidade das discontinuidades. Outros fatores, como especificação dos equipamentos de registro, são diferentes em cada técnica [Geldar 1995].

### 1.3.1 Levantamento de perfil

O método básico para realização de um levantamento de refração sísmica consiste na construção de um arranjo de sensores alinhados (linha sísmica), com extensão de sete a dez vezes maior do que a maior profundidade a ser mapeada. Os tiros devem ser instalados em intervalos regulares ao longo da linha. Essa extensão garante que haverá uma porção suficiente das frentes de onda refratadas na seção sísmica. Os tiros realizados ao longo da linha permitem detectar alguma variação lateral de velocidade, bem como apontar inclinações em alguma discontinuidade de subsuperfície.

A Figura 1.1 mostra um exemplo composto por uma interface, onde os tiros A, C, E e G foram disparados [Geldar 1995]. Por situar-se na parte à esquerda da linha sísmica, o tiro A é também conhecido como *tiro direto*. Contrariamente, o tiro G é denominado como *tiro reverso*, e os tiros C e E são intermediários. Dependendo da posição do tiro, a carga utilizada para explosão pode variar. Maiores cargas situar-se-ão nos extremos da linha. Além disso, os tiros intermediários podem mapear ambos os lados da linha, desde que tenha sensores disponível.

As ondas diretas são frentes que trafegam em um mesmo meio, sem passar por nenhuma discontinuidade. Consideram-se ondas refletidas, aquelas que incidem na discontinuidade com um certo ângulo, e parte de sua energia retorna para superfície. A outra parte é transmitida para outra camada.

O fenômeno da refração ocorre no momento em que a frente de onda incide sobre a discontinuidade no ângulo de reflexão crítico. Nesse instante, o raio trafega paralelamente à discontinuidade com velocidade do meio inferior, gerando as chamadas ondas refratadas ou *head waves*.

Essa característica é regida pela lei de Snell, que descreve o comportamento da trajetória do raio entre meios com propriedades físicas diferentes. Quanto maior o contraste de velocidade, menor será o ângulo de reflexão crítico. Os parâmetros referentes aos meios de propagação, como velocidade e profundidade da descontinuidade, podem ser obtidos pela observação dessas frentes de onda [Stein e Wysession 2003].

Apesar da simplicidade na consideração da forma de propagação das frentes de onda, definições sobre não homogeneidade do meio e dispersão de energia do meio não foram consideradas. Mesmo assim, os resultados obtidos a partir do simples modelo coincidem com os tempos de chegada obtidos em experimentos reais. Dentre as aplicações que empregam levantamentos de refração sísmica destacam-se a exploração mineral e o estudo de estruturas e descontinuidades mais profundas, como a Moho, que divide a crosta continental e o manto litosférico.

### 1.3.2 Refração sísmica profunda

A refração sísmica profunda destaca-se por quantificar com maior precisão a velocidade das ondas sísmicas nas camadas que compõem o meio de estudo. Para determinar a profundidade da crosta continental, os levantamentos utilizam linhas entre 250 e 400 quilômetros de extensão, com tiros espaçados de 20 a 100 quilômetros. O objetivo do levantamento é registrar na seção a refração da Moho (Pn), além das fases diretas, reflexão e outras refrações, afim de determinar com segurança a distribuição de velocidade das ondas de corpo (P e S) na crosta e no manto superior.

A Figura 1.2 mostra uma seção sísmica, ou sismograma composto, para a onda P. As fases da refração e reflexão da Moho (Pn e PmP) (figura 1.2) estão identificadas [Melo 2005]. As linhas pontilhadas em vermelho indicam as fases manualmente identificadas. O levantamento foi feito na região de Porangatu, para estudo da estrutura crustal da Província Tocantins [Soares et al. 2006].

Os valores referentes às propriedades sísmicas da crosta continental variam de acordo com as

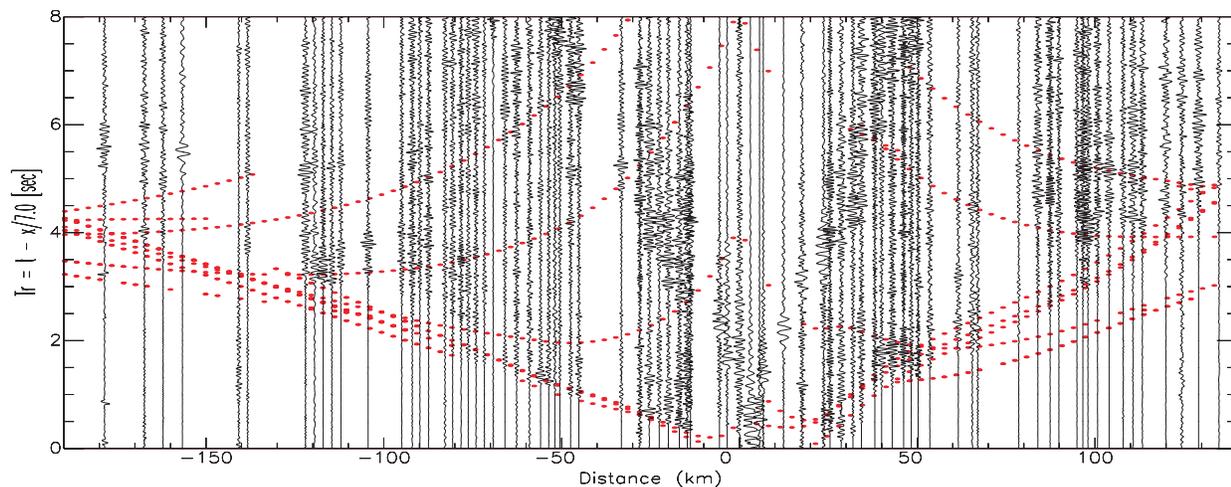


Figura 1.2: Sismograma composto das ondas P do tiro 4 da linha de refração sísmica profunda de Porangatu. As linhas pontilhadas em vermelho indicam os grupos de fase identificadas por meio de análise manual dos traços. Fonte: [Soares 2005].

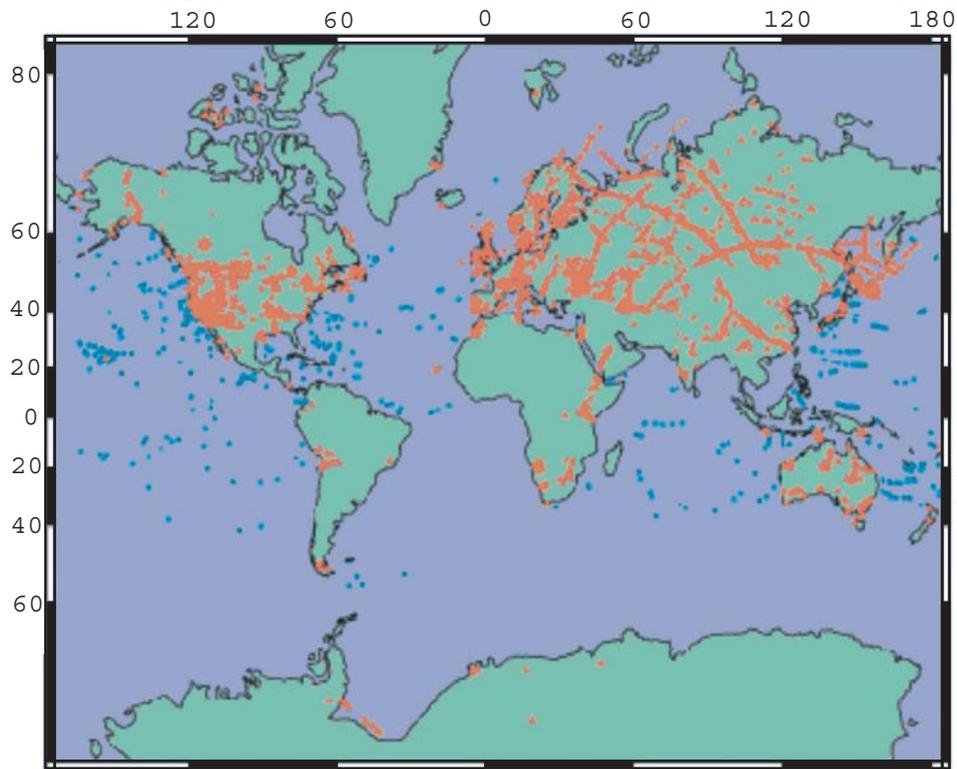


Figura 1.3: Distribuição mundial de mais de 5000 levantamentos de sísmica de refração e reflexão, e função do receptor. Os triângulos vermelhos correspondem à localização de dados continentais e os azuis, de oceânicos. Fonte: [Christensen e Mooney 1995]

características físicas dos ambientes geotectônicos. A compilação dos levantamentos de refração sísmica profunda foi feita por [Christensen e Mooney 1995] no intuito de determinar um valor médio para a espessura da crosta continental, bem como as velocidades médias da crosta e manto superior. Os levantamentos utilizados para o estudo são mostrados na Figura 1.3.

É evidente a divisão geográfica do número de levantamentos de refração realizados nos últimos cinquenta anos. Esse contraste prejudica a determinação de um parâmetro global, dado que nem todos os ambientes foram devidamente amostrados. Afim de contornar a situação, os autores em [Christensen e Mooney 1995] e [Holbrook, Mooney e Nicholas 1992] propuseram a utilização de correções ponderadas baseadas nas extensões de cada província.

A compilação proposta por [Christensen e Mooney 1995] destaca valores para espessura média da crosta, velocidade média da crosta e velocidade do manto superior para cinco ambientes geotectônicos: orógenos, escudos e plataformas, arcos magmáticos, rifts e crosta estendida.

Orógenos (do grego *oros*=montanha; *genus*=geração/origem) consistem nas províncias tectônicas onde ocorrem os mais diversos processos geológicos relacionados ao confronto de placas litosféricas, dando origem as grandes cadeias montanhosas da Terra [IG-UnB]. Regiões de orógeno apresentam espessura crustal média de  $46,3 \pm 9,5$  km, velocidade média da onda P de  $V_c = 6,39 \pm 0,25$  km/s na crosta, e  $V_m = 8,01 \pm 0,22$  km/s no manto superior.

Escudos são grandes áreas de exposição de embasamento pré-cambriano, em geral com superfícies suavemente convexas. Ao redor dos escudos desenvolvem-se as plataformas, porções dos

continentes cobertas por estratos predominantemente sedimentares [Ventura 2006]. Apresentam espessura crustal média de  $41,5 \pm 5,8$  km, velocidade média de  $V_c = 6,42 \pm 0,20$  km/s na crosta, e  $V_m = 8,13 \pm 0,19$  km/s no manto superior.

Arco magmático é definido como uma faixa ou cinturão curvilíneo de ocorrências de vulcões acima de uma região de confronto entre placas tectônicas (zona de subducção). Caracteriza-se por apresentar magmatismo plutônico e vulcânico acrescionário [IG-UnB]. O arco magmático apresenta espessura crustal de  $38,7 \pm 9,6$ , e velocidades  $V_c = 6,44 \pm 0,25$  km/s e  $V_m = 7,95 \pm 0,23$ .

Rifts consistem em estruturas de bacia tectônica, margeadas por falhas de gravidade, originadas por tectônica extensional sobre *hot spot*, desenvolvendo vale ou depressão extensa em continentes ou em oceanos [IG-UnB]. De acordo com [Christensen e Mooney 1995], a espessura média da crosta é de  $36,2 \pm 7,9$  km, e velocidades  $V_c = 6,36 \pm 0,23$  km/s e  $V_m = 7,93 \pm 0,15$  km/s.

Crosta extendida é aquela que foi alongada em mais de 50%. Rifts, depressões continentais estreitas e alongadas, limitadas por falhas normais, indicam ruptura de toda espessura da crosta devida a estiramento. A espessura média de uma crosta estirada é  $30,5 \pm 5,3$  km, com velocidade média de  $V_c = 6,21 \pm 0,22$  km/s e  $V_m = 8,02 \pm 0,19$  km/s.

Baseado em todos os levantamentos apresentados, uma média ponderada global foi estimada por [Christensen e Mooney 1995] para as propriedades sísmicas da crosta continental terrestre. A compilação de todos os parâmetros resultou em uma espessura média da crosta de  $41,0 \pm 6,2$  km, e velocidades  $V_c = 6,45 \pm 0,21$  km/s para a crosta e  $V_m = 8,09 \pm 0,20$  km/s para o manto. A Tabela 1.1 sintetiza a estimativas obtidas por [Christensen e Mooney 1995] para todos os ambientes tectônicos e a média global.

O estudo da estrutura da crosta continental brasileira é feito por meio de levantamentos geofísicos realizados ao longo dos últimos vinte e sete anos. Os levantamentos envolvem a utilização de técnicas como função do receptor, gravimetria, tomografia sísmica e refração sísmica para avaliar, de diferentes pontos de vista, a estrutura da crosta continental do Brasil.

A refração sísmica representa uma técnica de inferência dentre os métodos citados. No Brasil existem registros de três levantamentos realizados: Itabira, Santa Juliana e Porangatu-Cavalcante [Soares 2005]. A Figura 1.4 mostra a localização geográfica dos levantamentos de refração e das estações utilizadas para função do receptor. A compilação dos resultados obtidos dos levantamentos de refração, função do receptor e valores globais, fornecem as profundidades da Moho ilustradas.

Tabela 1.1: Espessura e Velocidades crustais para Cinco Províncias Tectônicas e Crosta Continental Média. Fonte: [Christensen e Mooney 1995].

Propriedade Crustal	Orógenos	Escudos e Plataformas	Arco Magmaico	Rifts	Crosta Extendida	Média Global
Espessura Crustal (km)	$46,3 \pm 9,5$	$41,5 \pm 5,8$	$38,7 \pm 9,6$	$36,2 \pm 7,9$	$30,5 \pm 5,3$	<b><math>41,0 \pm 6,2</math></b>
Veloc, média $V_c$ (km/s)	$6,39 \pm 0,25$	$6,42 \pm 0,20$	$6,44 \pm 0,25$	$6,36 \pm 0,23$	$6,21 \pm 0,22$	<b><math>6,45 \pm 0,21</math></b>
Velocidade $V_m$ (km/s)	$8,01 \pm 0,22$	$8,13 \pm 0,19$	$7,95 \pm 0,23$	$7,93 \pm 0,15$	$8,02 \pm 0,19$	<b><math>8,09 \pm 0,20</math></b>

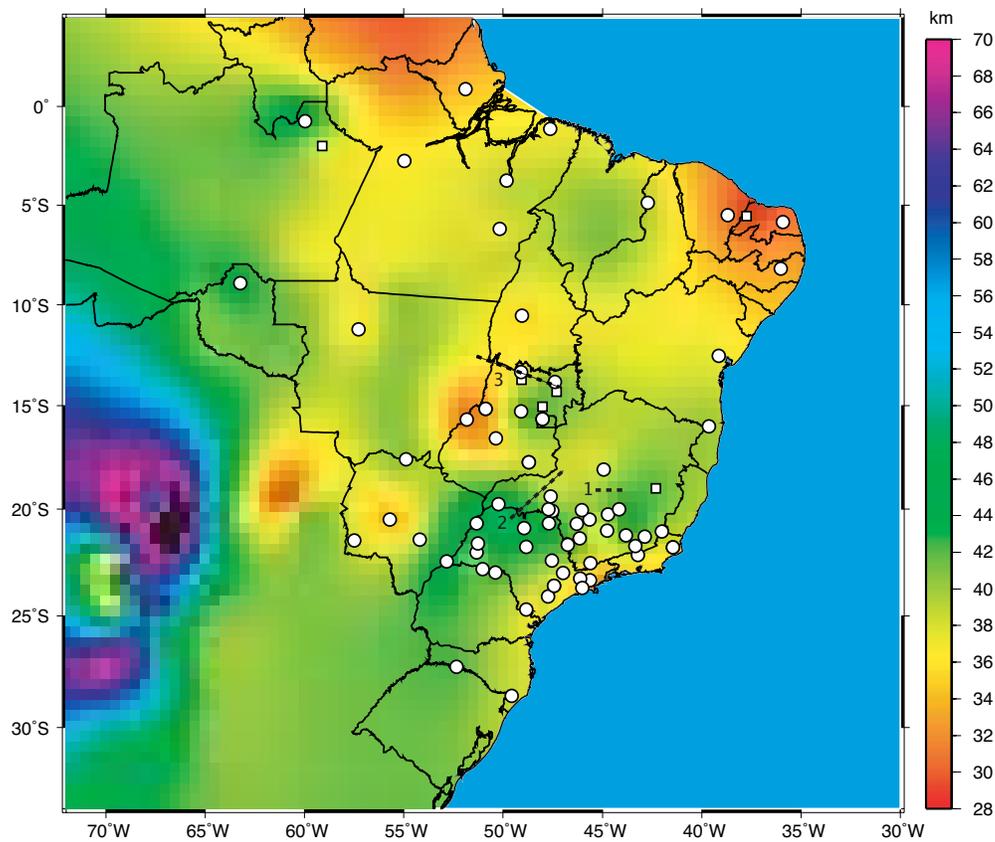


Figura 1.4: Distribuição de profundidades crustais no Brasil e em regiões adjacentes calculada a partir de levantamentos brasileiros de sísmica de reflexão e refração (quadrados), função do receptor (círculos) e de valores provenientes do modelo de espessuras mundial. As linhas tracejadas indicam a localização dos levantamentos de refração sísmica profunda no Brasil: (1) Giese & Schuttler 1980; (2) Perosi 2000; (3) Soares 2005 e Perosi 2006. Fonte: [Ventura 2006].

## 1.4 Definição do problema

Considere uma linha de refração sísmica profunda no qual a crosta seja caracterizada como uma camada homogênea e uniforme, ou seja, não possui descontinuidade vertical. Nesse caso, a curva de tempo de trânsito formada apenas pelas primeiras quebras das ondas sísmicas pode ser dividida em dois grupos principais de fases. O grupo das ondas direta, denominadas de  $P_g$ , e o grupo de ondas refratadas na descontinuidade de Moho, denominadas de  $P_n$ , limite crosta manto. A Figura 1.5 mostra a curva de tempo de trânsito gerada a partir de uma fonte sísmica controlada para modelo crustal de duas camadas.

Se considerarmos a crosta com uma variação de velocidade mais acentuada, a uma profundidade entre 17 e 20 km, podemos dividi-la em duas regiões, crosta superior e crosta inferior. Apesar da existência de variação de velocidade entre as duas regiões da crosta, o contraste com a Moho ainda é mais acentuado. Para essa suposição o grupo de fases presentes na curva de tempo de trânsito pode ser dividido em  $P_g$ ,  $P_n$ , acrescido das ondas provenientes da refração internas na crosta ( $P_i$ ). A Figura 1.6 mostra a curva gerada para essa situação [Zelt 1999].

Em casos reais de estudo de refração sísmica profunda [Giese 1976], verifica-se que a região

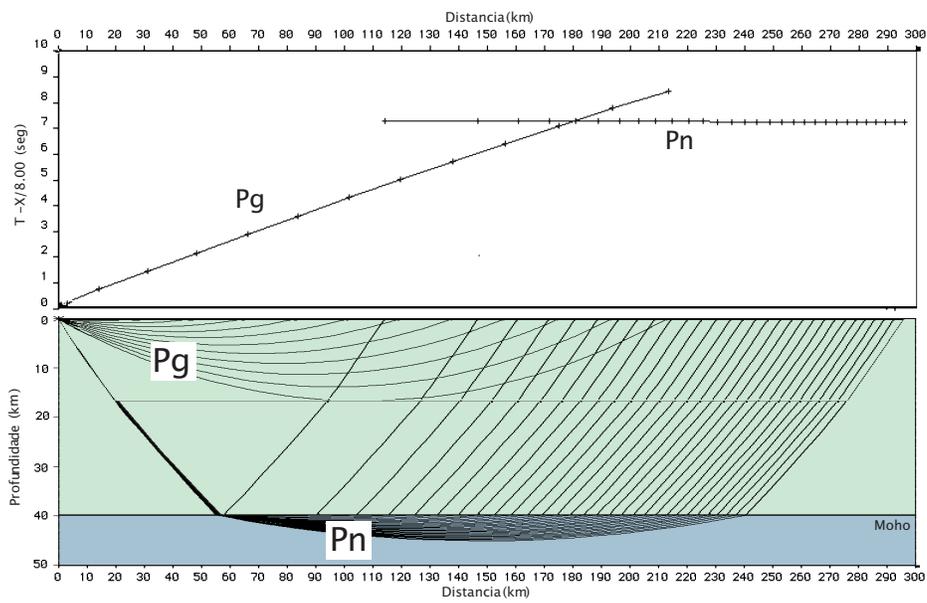


Figura 1.5: Tempo de trânsito com o traçado de raios para os grupos de fase Pg e Pn. Note que a Pg é mascarada pela chegada da Pn antes mesmo de propagar-se no meio da crosta.

de divisão entre as crostas, está localizada entre 25 e 30 km de profundidade. Essa divisão é caracterizada pela diferente composição de materiais e/ou do aumento do grau metamórfico das rochas causado pela pressão litosférica, com conseqüente variação na velocidade de propagação. Em face à essa situação, os grupos de fase das três regiões ainda existirão na curva de tempo de

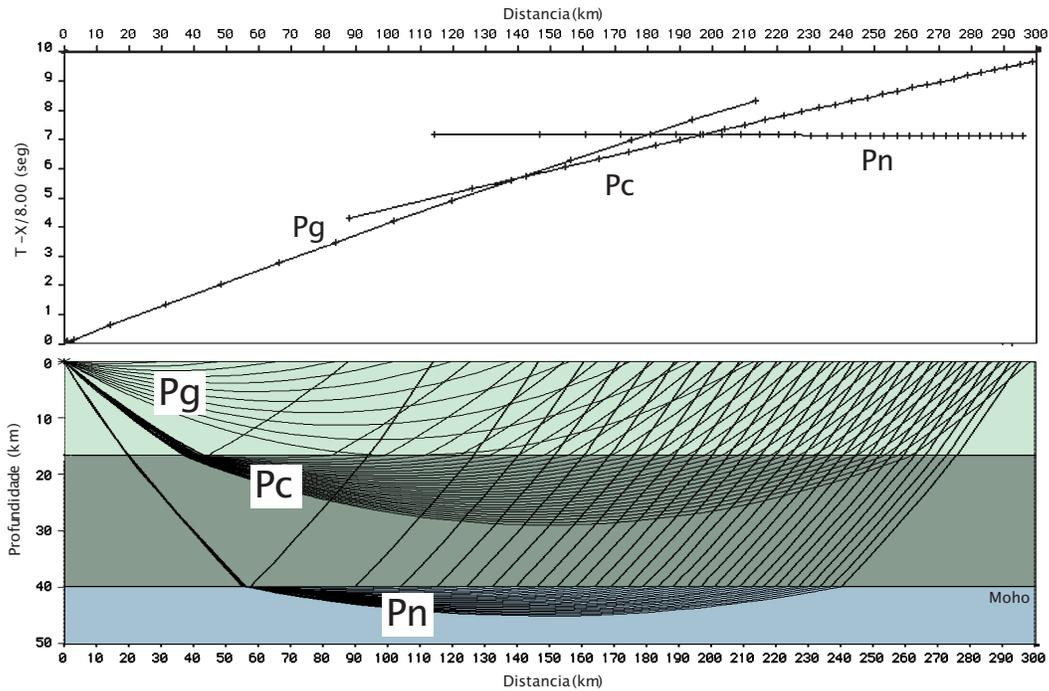


Figura 1.6: Tempo de trânsito com o traçado de raios para os grupos de fase Pg, Pc e Pn. Caso a divisão entre crosta superior e inferior ocorra no meio de sua estrutura, a refração entre elas ainda aparece como primeira quebra.

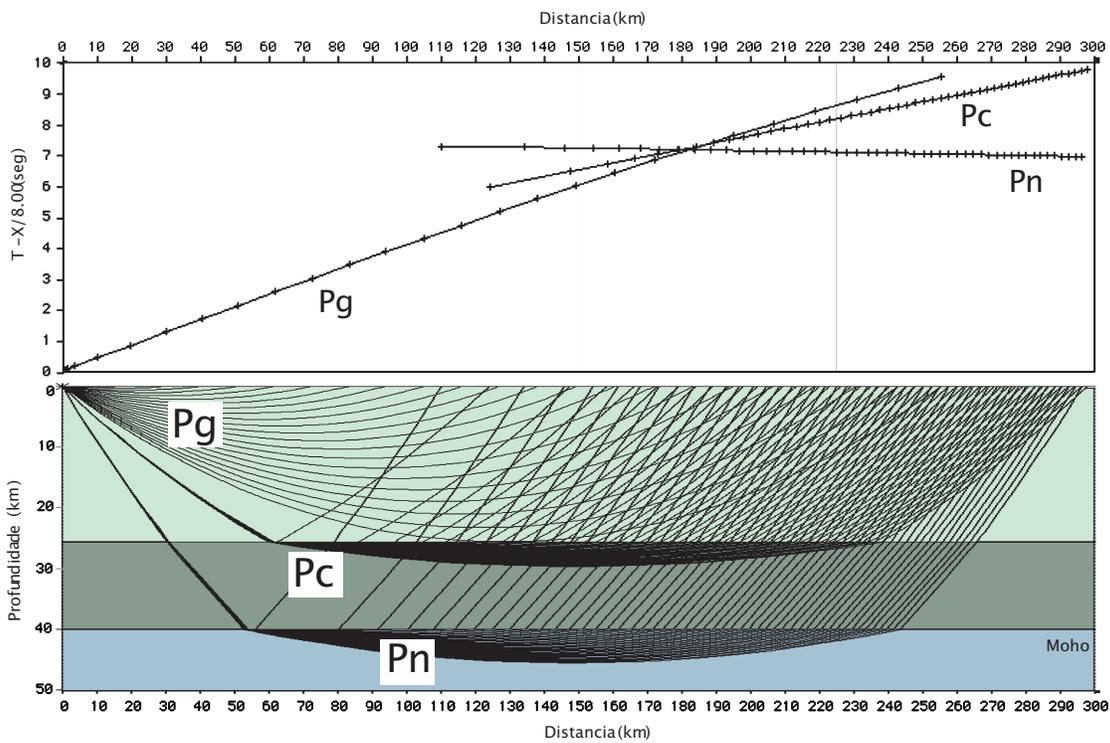


Figura 1.7: Tempo de trânsito com o traçado de raios para os grupos de fase  $P_g$ ,  $P_c$  e  $P_n$ , com a divisão entre crosta e manto a 25 km de profundidade. Note que a chegada da fase  $P_c$  é posterior à das fases  $P_g$  e  $P_n$ .

trânsito, mas a chegada do grupo de fases  $P_c$  ocorre após a chegada do grupo de fases  $P_g$  e  $P_n$ , descaracterizando-o como primeira quebra. A Figura 1.7 mostra o tempo de trânsito para essa situação de divisão da crosta.

Para o três casos considerados, assume-se que a curva de tempo de trânsito é representada como a primeira ocorrência de um evento no tempo, dado uma fonte controlada com localização conhecida. As chegadas observadas em  $\mathcal{N}$  sensores distribuídos ao longo de uma linha de refração sísmica, podem ser agrupadas na forma de um vetor  $\mathcal{Z} = \{(x_j, t_j) | j = 1, \dots, \mathcal{N}\}$ , onde  $t_j$  é o tempo de chegada da primeira fase observada em um sensor localizado à  $x_j$  quilômetros da fonte sísmica.

## 1.5 Construção da base de dados sintéticos

A utilização da base de dados sintéticos visa validar os processos envolvidos na geração do modelo de velocidades. A adoção de modelos simples facilita a comparação dos resultados fornecidos com os parâmetros de geração dos dados. Este trabalho adota a abordagem mais simples nos modelos de refração sísmica profunda para descrever e validar todos os processos desenvolvidos. Neste modelo, a Moho comporta-se com uma interface plana e a crosta e o manto são materiais homogêneos com variação de velocidade constante e crescente, de acordo com o aumento da profundidade.

A Figura 1.8 mostra uma crosta com velocidade média de propagação  $v_c = 6,5$  km/s e profun-

Tabela 1.2: Parâmetros adotados para o modelo da Figura 1.8.

Velocidade Média na Crosta	Profundidade	Velocidade no Manto Superior
$v_c = 6.5 \text{ km/s}$	$h_c = 37 \text{ km}$	$v_m = 8,0 \text{ km/s}$

didade  $h_c = 37 \text{ km}$ . Na região da Moho, a velocidade de propagação no manto superior assume valor  $v_m = 8,0 \text{ km/s}$ . A Tabela 1.2 mostra as propriedades físicas adotadas na estrutura crustal e velocidade de propagação das ondas P.

Os sismogramas sintéticos foram gerados utilizando o pacote de modelagem direta 2D. Dado o modelo da Figura 1.8, o sismograma é gerado a partir da execução de três rotinas: 1) modelamento numérico das fases, em um meio bidimensional com variação lateral, pelo método do traçado do raio, 2) geração do sismograma sintético baseado na saída apresentada pela etapa (1), e 3) cálculo do tempo de trânsito das frentes de onda. Desenvolvido pelo grupo de geofísica da *Charles University* [Molotkov 1977], o pacote serve como referência em estudos de refração sísmica profunda. Além da geração de sismogramas sintéticos, possui módulos capazes de calcular o tempo de trânsito dos raios, diagrama de movimento de partícula da frente de onda e suavização do modelo de velocidade.

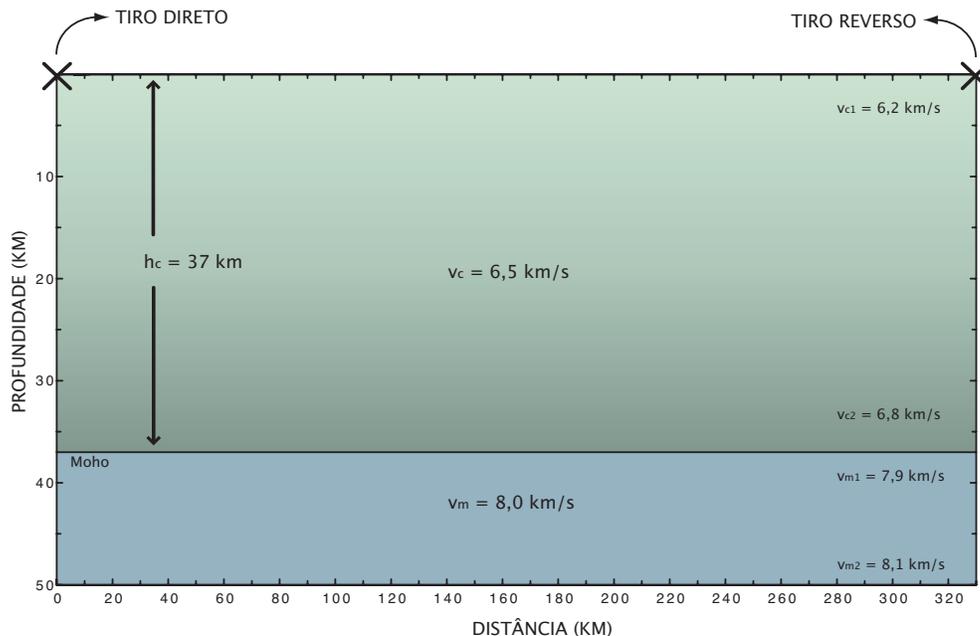


Figura 1.8: Modelo de estrutura crustal utilizado para gerar a base de dados sintéticos. Neste modelo a Moho é uma interface plana a 38 km de profundidade, os materiais da crosta e do manto superior são homogêneos, e os tiros são realizados nas extremidade da linha sísmica. Na crosta a velocidade de propagação possui variação constante e positiva de 6,2 a 6,8 km/s da superfície para base. A velocidade de propagação no manto superior varia de 7,9 a 8,1 km/s.

O módulo responsável pelo cálculo do traçado de raio faz a simulação para um número previamente determinado de sensores distribuídos ao longo da superfície de uma linha sísmica, ou de um perfil vertical. A geração dos raios é semi-automática. Se propriedades do meio como coeficientes de absorção e espalhamento geométrico forem considerados, é possível inferir sobre o comportamento das amplitudes e deslocamento em fase dos traços. Por questões de simplicidade, este trabalho considera que o meio de propagação é totalmente elástico, e não apresenta perdas para o modelo apresentado. O tempo de trânsito é gerado no intuito de comparar o tempo de chegada sintético com o tempo apresentado pelo algoritmo de detecção das fases primárias e PmP. O sismograma composto utilizado é o mesmo que será apresentado para descrição do método proposto.

O módulo para geração do sismograma sintético utiliza informações como tempo de trânsito, amplitude e deslocamento de fase para determinar a forma de onda em todos os sensores selecionados. Todos os tipos de fases elementares podem ser geradas em forma de traços sintéticos, armazenados em um arquivo de saída. A função que simula a fonte sísmica para geração do sismograma é expressa por uma portadora harmônica, modulado por uma função gaussiana

$$f(t) = e^{-\left(\frac{2\pi ft}{\gamma}\right)^2} \cos(2\pi ft + \psi), \quad (1.1)$$

onde  $t$  representa o tempo,  $f$  é a frequência.  $\gamma$  e  $\psi$ , juntamente com  $f$ , constituem os parâmetros livres da função da fonte, e devem ser estipulados de acordo com o objeto de estudo. Diversas forma de onda são geradas por meio de manipulação dos parâmetros. Uma rotina em Matlab 6.5 foi desenvolvida para ler o arquivo de saída, e gerar sismograma composto semelhante aos utilizados em refração sísmica profunda.

Na validação do algoritmo proposto para dados sintéticos, dois tiros foram utilizados para construção do modelo de velocidade. De acordo com a Figura 1.8, os tiros direto e reverso localizam-se em pontos extremos da linha sísmica. A Tabela 1.3 mostra os parâmetros de fonte adotados para ambos os tiros, determinados a partir de traços sísmicos reais [Leandro]. Como o meio considerado é homogêneo, não houve a necessidade de estabelecer diferentes parâmetros para cada tiro. A Figura 1.9 mostra a forma de onda resultante da combinação dos parâmetros livres.

## 1.6 Contribuições Apresentadas

Este trabalho foca a obtenção das principais características médias da crosta continental a partir dos registros adquiridos por meio de levantamentos de refração sísmica profunda. As seguintes propriedades sísmicas são estimadas: espessura média da crosta, e as velocidades média de propagação da onda P na crosta e no manto litosférico. O sismograma composto é utilizado como valor

Tabela 1.3: Parâmetros livres da função de fonte sísmica (Equação 1.1), adotados para geração do sismograma sintético.

Número de Sensores	Frequência (Hz)	$\gamma$	$\psi$ (seg.)	Amostragem $T_{acq}$ (seg.)
30 (eqüidistantes)	8	6,298	3,022	0,02

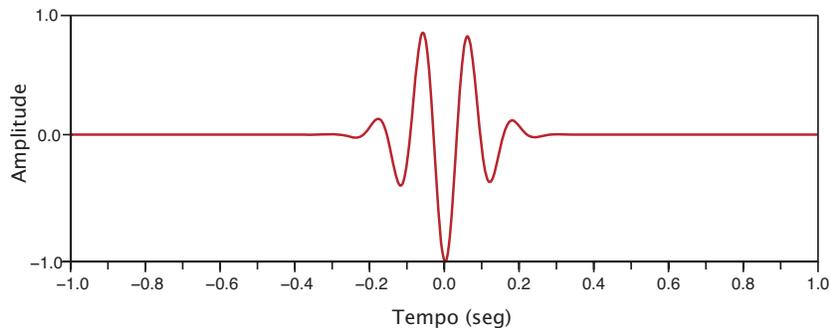


Figura 1.9: Forma de onda proveniente da manipulação dos parâmetros livres da Tabela 1.2 para função de geração de fonte sísmica.

de entrada, onde os métodos propostos transformarão as informações contidas nos registros em estimativas das propriedades sísmicas da área de estudo.

Os itens a seguir resumem as principais contribuições desenvolvidas para obtenção automática dos parâmetros que descrevem as características iniciais da crosta:

- Algoritmo de detecção do tempo de quebra das fases primárias em linhas de refração sísmica;
- Segmentação dos pontos de tempo de trânsito e classificação entre ondas diretas (Pg) e refratadas (Pn);
- Detecção do tempo de percurso da fase refletida na Moho (PmP);
- Estimação da velocidade de propagação da onda compressional no manto superior;
- Estimação da velocidade média de propagação e espessura da crosta.

Sismogramas reais e sintéticos foram utilizados para avaliação do comportamento dos algoritmos desenvolvidos neste trabalho. Os dados sintéticos foram gerados a partir do pacote de traçado de raios para modelagem direta em duas dimensões, SEIS88 [Molotkov 1977]. Os dados reais consistem nos sismogramas compostos adquiridos do levantamento de refração sísmica de Porangatu-Cavalcante [Soares 2005], onde foram utilizados os registros efetuados no tiros localizados nos pontos extremos de cada linha sísmica.

Todos os algoritmos utilizados para tratamento dos registros e estimação dos parâmetros foram codificados em ambiente Matlab. Matlab é um programa comercial de simulação numérica que provê um ambiente simplificado para resolução e visualização de diversos problemas matemáticos. Os algoritmos utilizados para conversão da base de dados de Porangatu-Cavalcante, do formato SAC (*Seismic Analysis Code*) para o ambiente Matlab, moldados para utilização neste trabalho. A Figura 1.10 apresenta um diagrama em blocos dos processos desenvolvidos.

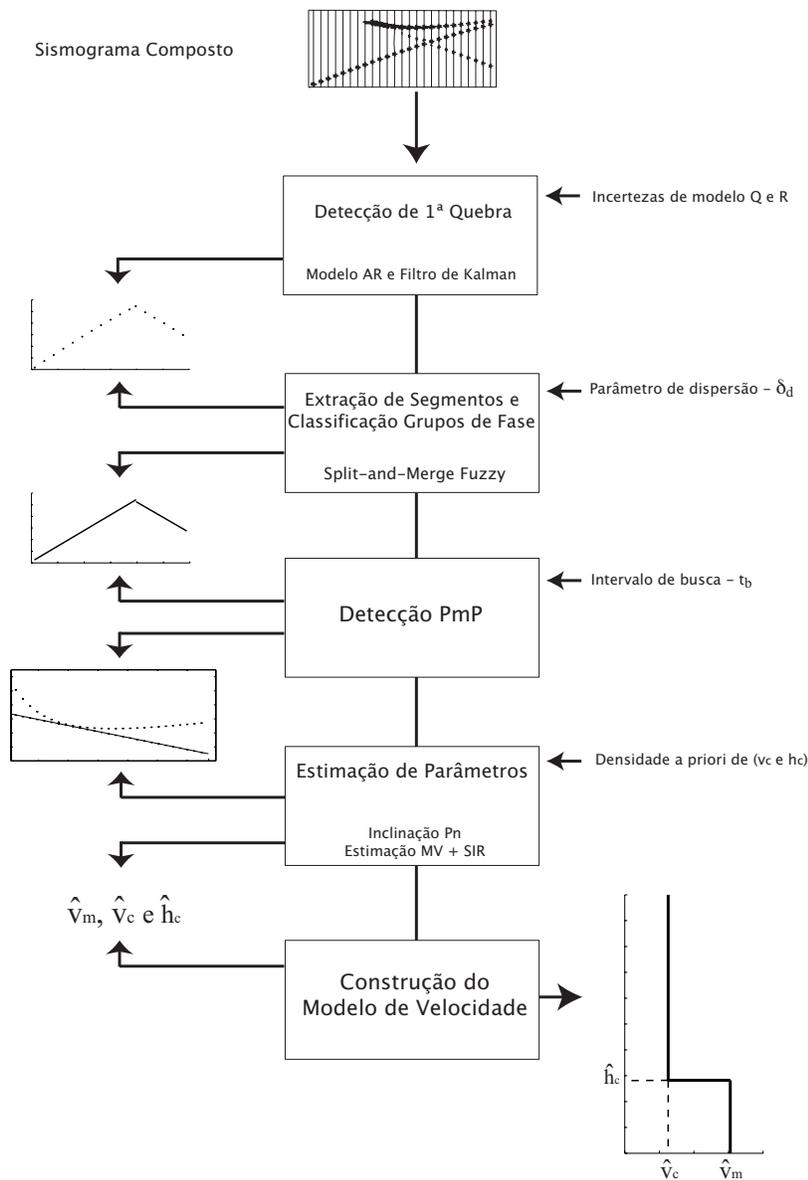


Figura 1.10: Diagrama em blocos dos processos utilizados para construção do modelo de velocidades a partir do sismograma composto de levantamentos de refração sísmica.

## 1.7 Apresentação da dissertação

A dissertação foi organizada em seis capítulos mais dois anexos. A divisão consiste em introdução, três capítulos para descrever as metodologias empregadas para estimação das propriedades físicas da crosta continental, resultados e discussões dos dados e conclusão.

O Capítulo 1 consiste neste capítulo introdutório e visa contextualizar a pesquisa e a organização da dissertação. A seguir, o Capítulo 2 apresenta a metodologia empregada para detecção das primeiras chegadas em sismogramas compostos, utilizando técnicas de filtragem estocástica. Este capítulo subdivide-se em revisão bibliográfica, algoritmo de detecção de fases e considerações finais sobre o algoritmo.

O Capítulo 3 discute as técnicas de extração e classificação dos segmentos obtidos das fases

detectadas no Capítulo 2. A extração de retas utiliza a técnica SMF (*Split-and-Merge Fuzzy*), e a classificação consiste na divisão dos segmentos em grupos de fase direta (Pg) e refratada pela Moho(Pn). O capítulo é subdividido em revisão bibliográfica, algoritmo de extração de retas, classificação em grupos de fase, propagação de incertezas e considerações sobre os métodos.

O Capítulo 4 consiste na método utilizado para detecção do grupo de fase da reflexão de alto ângulo (PmP) e estimação dos parâmetros médios que descrevem a estrutura da crosta continental. A subdivisão do capítulo consiste em: revisão bibliográfica, detecção da PmP, estimação dos parâmetros e construção do modelo de velocidade, e considerações finais.

O Capítulo 5 apresenta os resultados e discussões dos algoritmos desenvolvidos a partir de uma base de dados sintéticos. Dados reais das linhas de Cavalcante e Porangatu, localizadas na Província Tocantins, são utilizados como discussão de caso. As principais conclusões e propostas futuras deste trabalho são sintetizadas no Capítulo 6.

O Anexo I mostra os resultados intermediários, obtidos por cada método, na obtenção dos parâmetros médios da crosta continental nos levantamentos de refração sísmica profunda executados pelas linhas de Cavalcante e Porangatu.

O Anexo II reúne os códigos implementados em ambiente Matlab para condicionamento dos registros, detecção das fases, extração e classificação em segmentos, detecção das fases tardias e estimação da espessura média crustal, e das velocidades média da crosta e do manto.

## Capítulo 2

# Identificação da Primeira Quebra em Traços de Refração Sísmica Profunda

### 2.1 Introdução

A determinação dos tempos de chegada de ondas sísmicas tem aplicação em todos os campos da sismologia. Levantamento da estrutura interna e avaliação do risco de uma região ser afetada por terremotos, constituem exemplos da utilização das leituras dos registros sísmicos.

Em estudos de refração sísmica, a identificação dos tempos de chegada das fases primárias e secundárias em um sismograma composto, leva à determinação de modelos que descrevem a estruturação da crosta abaixo da superfície e inferem sobre as propriedades físicas do meio em estudo.

A curva de tempo de trânsito de ondas direta, refratada e refletida são obtidas a partir do registro em diferentes distâncias de uma fonte sísmica conhecida. O advento dos registros digitais e o considerável aumento do volume de dados na sismologia, fizeram pesquisadores do mundo inteiro engajar-se no desenvolvimento de técnicas para detecção e identificação não-supervisionada das fases sísmicas. Tarefas que antes eram desempenhadas por analista de dados, seriam realizadas por detectores automáticos [Bormann 2002].

Este capítulo tem como objetivo apresentar metodologia para identificação das primeiras fases compressoriais ( $P_n$  e/ou  $P_g$ ), denominadas primeiras quebras, de traços provenientes de experimentos de refração sísmica profunda.

O método proposto consiste em caracterizar com modelos autoregressivos (AR) a região do registro onde é verificada a ausência de evento sísmico, doravante denominada ruído sísmico de fundo. A partir de um modelo pré-estabelecido de evolução temporal dos coeficientes do modelo e amostras passadas do registro sísmico, o filtro de Kalman é implementado no intuito de calcular o resíduo entre o valor da amostra observado e sua estimativa. A chegada da fase é identificada caso haja uma alteração no comportamento estatístico da seqüência do resíduo calculada pelo filtro. A verificação é feita por meio de teste de hipótese qui-quadrado.

O capítulo organiza-se da seguinte forma: a seção 2.2 apresenta breve revisão sobre os principais

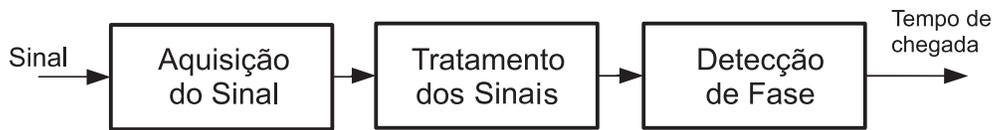


Figura 2.1: Diagrama em blocos simplificado do processo de detecção de fases de um evento sísmico. O dado analógico é discretizado no bloco Aquisição do Sinal e condicionado no bloco Tratamento dos Sinais. O processo de Detecção da Fase é aplicado ao dado transformado de forma a encontrar o instante de chegada do evento sísmico.

algoritmos empregados na detecção de fases, a seção 2.3 trata a descrição sobre a metodologia proposta para refração sísmica, e a seção 2.4 tece algumas considerações finais acerca do algoritmo proposto.

## 2.2 Revisão sobre os principais algoritmos de detecção de fases

A discretização dos traços sísmicos, a crescente capacidade de processamento computacional e as diversas aplicações dos dados de sismologia, são os principais fatores que justificam o desenvolvimento de algoritmos e técnicas de detecção automática de fases. O diagrama em blocos da Figura 2.1 mostra estrutura padrão para grande parte dos detetores desenvolvidos para o campo da sismologia.

Após a etapa de discretização, os dados são pré-processados e condicionados para detecção das fases. Técnicas de normalização dos traços, processamento de sinais no domínio da frequência, treinamento de redes neurais e transformação do espaços de soluções, constituem exemplos aplicados no tratamento dos sinais.

Na etapa de detecção, os traços pré-processados são analisados e comparados com padrões os quais representariam a chegada de uma fase sísmica. Dentre os métodos existentes, destacam-se [Cuenot 2001]:

- Análise da energia dos traços sísmicos por representação de uma função característica;
- Construção de modelos autoregressivos para representação do sinal sísmico;
- Algoritmos baseados na análise dos dados utilizando Estatística de Alta Ordem (*High Order Statistics* - HOS) ;
- Construção de Redes Neurais Artificiais (RNA) previamente treinadas para reconhecer mudanças no traço no momento da chegada da fase.
- Algoritmos baseados em Transformada Wavelet Discreta.

### 2.2.1 Algoritmos baseados em análise da energia dos traços sísmicos

Esta família de algoritmos parte da comparação da Média do Termo Curto (*Short Term Average* - STA), sensível às rápidas variações de amplitude, com a Média do Termo Longo (*Long Term*

*Average - LTA*), que observa variações de baixa frequência. A relação entre os dois termos é semelhante à medição da razão sinal/ruído local. Caso a relação seja superior a um limiar previamente estipulado, constata-se a chegada de uma fase.

O tamanho das janelas STA e LTA depende do conteúdo espectral do sismograma. A janela para o cálculo do STA deve ter o tamanho necessário para identificar um pico, enquanto a janela do LTA deve ser suficientemente longa para determinar o comportamento do ruído de fundo.

Inicialmente proposto por [Allen 1982], o algoritmo considera a construção de uma função característica de forma a auxiliar o cálculo dos valores STA e LTA. Essa função leva em consideração a taxa de amostragem dos dados, bem como os parâmetros dos filtros utilizados no pré-processamento. A chegada da fase é caracterizada quando a razão  $\frac{STA}{LTA}$  for maior que um valor estipulado. O algoritmo obtém bons resultados para eventos locais (distância menores que 100 km). Como eventos mais distantes (telessismos e sismos regionais) são caracterizados por mudanças na amplitude, e não nas componentes espectrais, o algoritmo não detecta fases que seriam facilmente observadas por um analista.

Uma melhoria do método de [Allen 1982] foi proposta em [Baer M. & Kradolfer 1987] por meio do cálculo intermediário para obter a função característica. Esse cálculo leva em consideração as variações na função característica e na janela LTA para determinar um valor adequado para o limiar estipulado para comparação. Em relação ao algoritmo anterior, o novo método é mais eficiente na detecção das fases P de eventos regionais e telessismos.

Semelhante aos métodos apresentados anteriormente, [Earle e Shearer 1994] introduziram um algoritmo, cujo principal objetivo é a determinação das primeiras chegadas, ainda que a relação sinal/ruído seja baixa, sob pena de detectar falso picos. Sua concepção dá-se a partir da construção de uma função envelope e da transformada Hilbert nos traços. Uma função de relação é concebida a partir de um filtro STA/LTA na função envelope. Essa função de relação, suavizada previamente por um filtro de Hanning, é utilizada para identificar a chegada da fase, onde um limiar é previamente determinado. Além do limiar de disparo, as larguras das janelas STA, LTA e do filtro de Hanning são inseridos no algoritmo.

Algoritmos que envolvem a análise de energia nos traços sísmicos são empregados em aplicações embarcadas (digitalizadores e sistemas de aquisição) que envolvem análise e resposta dos dados em tempo quase real (centro de detecção de terremotos e tsunamis).

### 2.2.2 Identificação de fases utilizando modelos autoregressivos

Os algoritmos autoregressivos (AR) baseiam-se na observação do comportamento de chegada das fases, por meio da construção de um modelo para todos coeficientes. As proposições feitas por [Kushnir 1990], [GSE/JAPAN/40 1992] e [Takanami e Kitagawa 1993] detectam a quebra da fase baseado na observação dos coeficientes dos modelos AR em instantes anterior e posterior ao evento. A diferença entre os métodos está na definição dos intervalos de varredura. [Kushnir 1990] utiliza um modelo AR em intervalos de tamanho fixo acerca da chegada do evento, [GSE/JAPAN/40 1992] trabalha na construção de filtros AR baseados na variância das janelas escolhidas, e constrói o modelo AR somente no início do traço antes da chegada do evento [Takanami e Kitagawa 1993].

Aplicado somente em sensores com três componentes de registro, os modelos AR são construídos com base na aproximação polinomial da matriz do espectro de potência calculada ao longo do traço sísmico. A busca do tempo de chegada é realizada pela observação de alguma mudança no comportamento dos modelos AR.

Com vertentes semelhantes, [Sleeman e Eck 1999] e [Morita e H.Hamaguchi 1984] modelam janelas do traço sísmico utilizando múltiplos processos autoregressivos localmente estacionários, considerados como intervalos anterior e posterior à chegada do evento sísmico. Em uma dessas janelas, a fase sísmica estará presente. Representam-se esses intervalos sob a forma de um modelo AR de ordem determinada pelo critério AIC (*Akaike Information Criteria*) [Akaike 1973]. O erro associado (parte não-determinística) é um ruído colorido, com média nula e descorrelacionado com o modelo construído. A partir da incerteza associada ao modelo AR, calcula-se a função do máximo da verossimilhança para os intervalos de traço sísmico. A partir de uma ordem  $M$  estipulada *a priori*, os autores buscam pelo menor valor do AIC para determinar a chegada da fase.

Os trabalhos [Leonard e Kenett 1999] e [Leonard 2000] afirmam que uma série temporal sísmica pode ser representada como um modelo autoregressivo de baixa ordem para descrever traços sísmicos. Amparados no fato que sinais mais complexos, como chegada de fases, são descritos por processos de maior ordem do que sinais menos complexos, os autores propõem um método para representar o traço sísmico por meio dos coeficientes de um modelo AR a partir da combinação linear de seus valores precedentes. Quando construído, o modelo proposto é utilizado no intuito de obter um segmento no sismograma. Desta forma, os tempos de chegada seriam realçados. Após a filtragem, aplica-se o critério AIC para determinar o instante de chegada da fase.

### 2.2.3 Algoritmos baseados no emprego da Estatística de Alta Ordem

Diferentemente de outros algoritmos de detecção, que preocupam-se em realçar o momento de chegada da fase, métodos que utilizam a HOS primam pela observação dos dados em sua forma bruta, com intuito de verificar o comportamento estatístico e Gaussiano do ruído de fundo. Uma mudança abrupta desse comportamento caracterizaria a provável chegada de uma fase. Baseados na análise temporal de estimativas de terceiro (*skewness*, ou obliquidade) e quarto momento (*kurtosis*, ou curtose) que avaliam a simetria e o comportamento extremo da função de densidade de probabilidade, é possível determinar o instante que ocorre a perturbação da seqüência Gaussiana.

O algoritmo descrito em [Saragiotis, Hadjileontiadis e Panas 2002] utiliza estimativas de terceiro e quarto momento para identificação do instante de chegada de um evento sísmico. Chamado de PAI-S/K (*Phase Arrival Identifier - Skewness / Kurtosis*), o método baseia-se no rastreamento do traço sísmico para avaliar se a janela de análise comporta-se com uma seqüência Gaussiana. Para seqüências branca, momentos de terceira e quarta ordem são nulos. No instante que esse comportamento não for verificado, é determinada a provável chegada da fase.

Diferentemente de [Saragiotis, Hadjileontiadis e Panas 2002], o trabalho posterior desenvolvido por [Saragiotis, Hadjileontiadis e Panas 2004] utiliza somente o momento de quarta ordem para rastrear a mudança no comportamento do traço sísmico. Os autores propõem uma forma alternativa de determinar o instante de chegada do evento com um intervalo de incerteza associado. Para

tanto, utilizam a inequação de Chebyshev para determinar a probabilidade da amostra localizar-se dentro do intervalo de uma determinada distribuição.

Em ambos os métodos, a grande vantagem na utilização de HOS em traços sísmicos, está na possibilidade de aplicação em locais contaminados por ruído sísmico de fundo. Entretanto, a correta determinação do instante de chegada está diretamente ligada ao dimensionamento da janela utilizada para as estimativas. A vantagem de [Saragiotis, Hadjileontiadis e Panas 2004] sobre [Saragiotis, Hadjileontiadis e Panas 2002] está no cálculo de um intervalo de confiança para o instante de ocorrência do evento sísmico.

#### 2.2.4 Algoritmos que utilizam redes neurais artificiais

As Redes Neurais Artificiais (RNA) simulam conexões entre neurônios do cérebro humano, e possuem a propriedade de extrapolar resultados a partir do número e complexidade da população de amostras empregadas no treinamento. Cada nó da rede representa uma unidade lógica (neurônio), agrupados em forma de camadas. As redes Perceptron de Multicamadas (MLP) são empregadas em métodos de identificação, caracterização e localização de eventos sísmicos. A contribuição que cada nó exerce sobre o processo de classificação dá-se por meio da determinação de seus pesos na rede, calculados durante o treinamento supervisionado [Haykin 2001].

Para detecção de fases, os algoritmos analisam os registros por meio de janelas móveis. Cada segmento é normalizado para evitar diferentes amplitudes na entrada da rede. A saída da RNA é representada sob forma de série temporal que realça o momento de identificação da fase sísmica.

O método proposto por [Dai e MacBeth 1995], determina o instante de chegada das fases a partir da análise das três componentes, ou somente a componente vertical [Dai e MacBeth 1997], do sistema de registro de dados sísmicos. A estrutura da rede foi definida com base na taxa de discretização do sistema de aquisição. A classificação dá-se por dois nós na camada de saída, onde é possível apontar a provável chegada de uma fase, ou se existe somente ruído.

A aprendizagem para este tipo de topologia de rede é do tipo supervisionada, com algoritmo de correção dos pesos por *backpropagation* com gradiente descendente. Este método procura os pesos da rede que melhor se adaptam em relação aos dados de entrada/saída utilizados na aprendizagem. Para assegurar a eficácia do treinamento da rede, os dados de exemplo devem conter a informação de interesse e o ruído dentro da janela de análise.

#### 2.2.5 Algoritmos baseados em Transformada Wavelet Discreta (DWT)

O trabalho [Zhang e Rowe 2003] desenvolveu um identificador automático de chegada baseado na representação do traço sísmico por meio de coeficientes em diferentes escalas da DWT. Juntamente com a aplicação do Critério de Informação de Akaike (*Akaike Information Criteria - AIC*) [Akaike 1973], o algoritmo detecta a presença do sinal de interesse. Diferentemente das amostras com ruído de fundo, os coeficientes da DWT mantêm-se constantes à medida em que escalas maiores da transformada são realizadas.

Em altas resoluções, os coeficientes da transformada mostram a estrutura fina do sinal, en-

quanto os de baixa resolução caracterizam sua parte mais bruta. Calcula-se a DWT em diversas escalas e, por meio de uma janela móvel, calcula-se o valor de AIC. O valor mínimo do critério significaria a chegada da fase. Este algoritmo tem o papel de determinar uma janela preliminar, onde um método mais preciso de determinação do tempo de chegada seja aplicado [Maeda 1985]. Esse método também utiliza o critério AIC aplicado ao dado bruto.

A metodologia de análise do sinal adotada em [Zhang e Rowe 2003], possibilita maior precisão de detecção do que [Maeda 1985], mesmo em sinais com altos níveis de ruído. O uso da DWT não permite determinar com precisão o tempo de chegada da onda P, devido à sua característica de influência (*COI - Cone of influence*) que gera ambiguidade na forma real do sinal, sendo, de acordo com [Maeda 1985], utilizado em conjunto com outro método de detecção de fase.

## 2.3 Algoritmo de detecção baseado no modelo AR de ruído para traços de refração sísmica profunda

### 2.3.1 Traço sísmico

A Figura 2.2 mostra um exemplo de uma seção de refração sísmica profunda com sismogramas agrupados. A formação da curva de tempo de percurso é constituída pelo tempo de chegada das fases diretas (Pg), refratadas (Pn) e refletidas (PmP) a partir de um evento controlado, localizado no início da seção (0 km).

O sismograma contém diversas informações acerca do ambiente sísmico ao qual está inserido o instante de chegada do evento. Regiões do registro que não contém informações sobre o evento sísmico foram denominadas ruído sísmico de fundo. Partindo dessa premissa, regiões do traço sísmico que representam a ocorrência do evento são consideradas como “sinais”. Para a identificação do instante da chegada do evento, faz-se necessária a definição do traço sísmico de tal forma que informações significantes sejam realçadas ante a transição ruído e sinal (Figura 2.3).

O traço sísmico, ou sismograma, pode ser definido como uma série temporal discreta  $z_n = [z_1, \dots, z_n]$  onde, em um determinado instante  $n_t$ , encontra-se a primeira quebra do sinal sísmico. Assume-se que, dentro do intervalo do sismograma, existem duas séries temporais distintas que correspondem ao ruído e ao evento de interesse. Em estudos de refração sísmica profunda, o sismograma composto é formado pelo agrupamento dos diversos traços adquiridos nos sensores distribuídos sobre uma linha de estudo [Giese 1976]. A quantidade e localização de cada traço devem ser planejados para cobrir a maior profundidade considerada no mapeamento. Como descrito no Capítulo 1, a extensão da seção deve ser de sete a dez vezes maior do que a maior profundidade da estruturação a qual se deseja estudar.

### 2.3.2 Modelo AR do ruído sísmico

Apontada como a mais simples e utilizada técnica para representar processos estacionários, o modelo autoregressivo (AR) consiste na representação de uma observação, baseada na combinação linear entre coeficientes fixos e observações passadas [Pollock 1999].

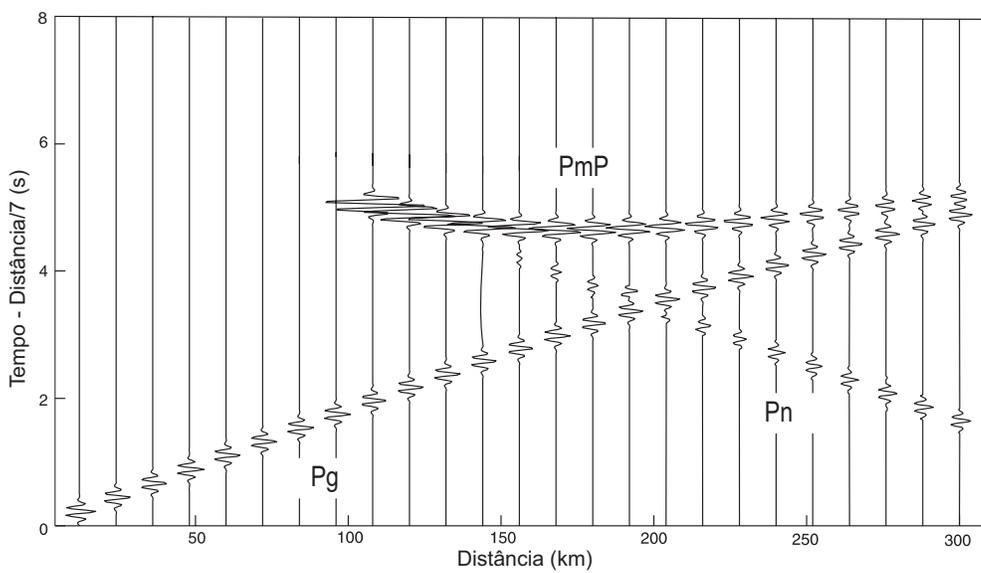


Figura 2.2: Sismograma sintético gerado a partir da junção de traços espacialmente distantes de uma fonte controlada na origem (0 km) para modelo de uma camada. Cada traço é representado com uma série discreta, e o evento sísmico ocorre em determinado instante  $z_e$ . Para facilitar a visualização, a seção foi reduzida em 7.0 km/s.

Considerando que o ruído de fundo em um traço sísmico comporta-se como processo estacionário, pode-se representá-lo em termos do modelo AR com ordem  $m$ . Em um sismograma escalar, composto por uma componente de registro  $z[t]$ , define-se o modelo AR de ordem  $m$

$$z[t] = \sum_{i=1}^m a_i z[t-i] + \epsilon[t], \quad (2.1)$$

onde  $a_i = \{a_1, \dots, a_m\}$  são os coeficientes do modelo e  $\epsilon[t]$  é o parâmetro de incerteza que representa a imprecisão na representação do processo. Assume-se que  $\epsilon[n]$  é um processo estacionário Gaussiano i.i.d., com média  $E\{\epsilon[n]\} = 0$  e variância  $E\{(\epsilon[n])^2\} = \sigma_\epsilon^2$ . Os coeficientes e da variância de  $\sigma_\epsilon^2$  são calculados por meio da resolução das equações de Yule-Walker.

Essas equações são definidas a partir da função de autocovariância do parâmetro de incerteza [Pollock 1999]

$$\gamma(z) = \frac{\sigma_\epsilon^2}{a(z)a(z^{-1})}. \quad (2.2)$$

Manipulando a equação (2.2),

$$\gamma(z)a(z) = \sigma_\epsilon^2 \frac{1}{a(z^{-1})}. \quad (2.3)$$

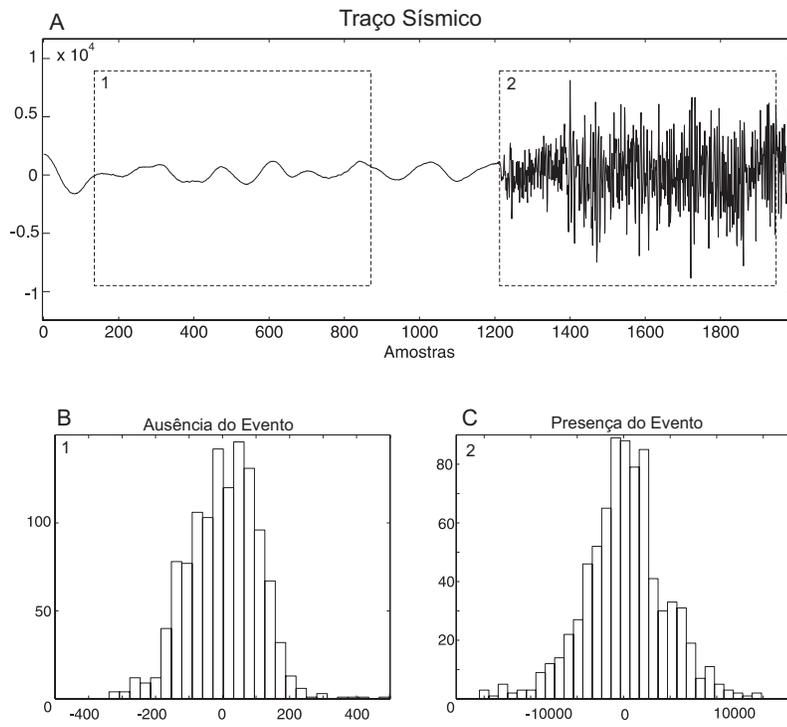


Figura 2.3: Resíduos do modelo AR de quarta ordem para região do traço sísmico em (A). O histograma feita da janela (1), onde não existe evento sísmico, mostra o histograma em forma de sino. O histograma da janela com evento (2), mostra uma concentração de pontos no centro do gráfico (C).

Por meio do rearranjo dos coeficientes de ambos os lados da equação (2.3), chega-se ao sistema de equações de Yule-Walker,

$$\begin{bmatrix}
 1 & a_1 & \dots & a_{m-1} & a_m \\
 a_1 & 1 + a_2 & \dots & a_m & 0 \\
 \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\
 a_{m-1} & a_{m-2} + a_m & \dots & 1 & 0 \\
 a_m & a_{m-1} & \dots & a_1 & 0
 \end{bmatrix}
 \begin{bmatrix}
 \gamma_0 \\
 \gamma_1 \\
 \vdots \\
 \gamma_{m-1} \\
 \gamma_m
 \end{bmatrix}
 =
 \begin{bmatrix}
 \sigma_\epsilon^2 \\
 0 \\
 \vdots \\
 0 \\
 0
 \end{bmatrix}. \quad (2.4)$$

A resolução dos coeficientes AR, a partir das equações Yule-Walker, é obtida pelo algoritmo recursivo de Levinson-Durbin [Pollock 1999]. O algoritmo foi desenvolvido por Levinson em 1947 e resolve o problema da inversão da matriz de Toeplitz. Inicialmente proposto para o caso de predição linear, foi aplicado por Durbin, em 1960, para estimação dos coeficientes AR.

De modo a preservar as características estocásticas do processo  $\epsilon[n]$ , a ordem do processo AR deve ser definida de acordo com o conteúdo espectral da série temporal. A Figura 2.3 mostra o exemplo de um modelo AR de quarta ordem construído para descrever duas séries temporais compostas por ruído e evento sísmico dentro do mesmo traço. A partir do histograma do resíduo  $\epsilon[n]$  construído percebe-se a forma de sino, característica em uma distribuição normal, enquanto a região do evento concentra um maior número de amostras no centro da distribuição.

### 2.3.3 Filtro de Kalman

Baseando-se nas diferentes características estatísticas entre os resíduos do modelo AR, pode-se estabelecer um sistema de estimação recursiva para identificação do tempo de chegada da primeira quebra. Valendo-se de técnicas de filtragem estocástica para caracterizar o sistema de evolução dos coeficientes do modelo AR, o principal objetivo é observar e rastrear o intervalo do traço sísmico no qual a gaussianidade da seqüência é preservada.

Introduzido inicialmente por [Kalman 1960], o filtro de Kalman tinha como principal objetivo descrever uma solução recursiva para problemas de filtragem sinais em sistemas discretos lineares, baseado em um sistema de espaço de estados [Brown e Hwang 1997]. Apesar de conhecido, o filtro de Kalman possui derivações conforme o processo empregado, como exemplo, se a seqüência que descreve a incerteza associada ao modelo é considerada como ruído colorido.

Este filtro caracteriza-se por ser um estimador recursivo ótimo, em um senso da mínima média quadrática do erro, para estimação do vetor de estados em um sistema estocástico linear [Jazwinski 1970]. A diferença do filtro de Kalman em relação a outros filtros ótimos, como o filtro de Wiener, é seu caráter recursivo de memória limitada [Pollock 1999].

A técnica do filtro de Kalman parte do modelo de duas equações. A primeira descreve a evolução do vetor de estados  $\mathbf{x}[k]$  cujos elementos armazenam informações sobre o sistema em um dado instante de tempo  $k$ . A equação de transição de estados é denotada por

$$\mathbf{x}[k] = \mathbf{A}[k]\mathbf{x}[k-1] + \mathbf{w}[k], \quad (2.5)$$

onde  $\mathbf{x}[k]$  é o vetor de estados de dimensão  $n$ ,  $\mathbf{A}[k]$  é uma matriz quadrada de transição de estados que descreve o comportamento do sistema, e  $\mathbf{w}[k]$  é uma seqüência branca de dimensão  $n$  com variância conhecida.

No mundo real, variáveis de estado não são diretamente observáveis. Ao invés disso, informações sobre o sistema são obtidas por meio de inferências em diferentes instantes de tempo. A segunda equação relaciona as informações do estado do sistema com o vetor de estados  $\mathbf{x}[k]$ , resultando na equação de observação

$$\mathbf{z}[k] = \mathbf{H}[k]\mathbf{x}[k] + \mathbf{v}[k], \quad (2.6)$$

em que  $\mathbf{z}[k]$  é o vetor de observação de dimensão  $m$ ,  $\mathbf{H}[k]$  é a matriz de medição e  $\mathbf{v}[k]$  representa uma seqüência branca, que no caso do traço com uma componente, é escalar.

As seqüências  $\mathbf{w}[k]$  e  $\mathbf{v}[k]$  são descorrelacionadas e suas matrizes de covariância dadas por

$$E\{\mathbf{w}[k]\mathbf{w}[i]^T\} = \begin{cases} \mathbf{Q}[k], & \text{se } k = i \\ \mathbf{0}, & \text{se } k \neq i \end{cases}$$

$$E\{\mathbf{v}[k]\mathbf{v}[i]^T\} = \begin{cases} R[k], & \text{se } k = i \\ \mathbf{0}, & \text{se } k \neq i \end{cases} \quad (2.7)$$

Para o processo de estimação, assume-se que, em um determinado instante de tempo  $k$ , o vetor  $\hat{\mathbf{x}}[k|k-1]$  seja conhecido. Esse valor *a priori* consiste na melhor estimativa do vetor de estados,

antes da ocorrência do tempo  $k$ . Assume-se que a matriz de covariância para  $\hat{\mathbf{x}}[k|k-1]$  também seja conhecida. O erro de estimação é definido como [Brown e Hwang 1997]

$$\mathbf{e}[k|k-1] = \mathbf{x}[k] - \hat{\mathbf{x}}[k|k-1], \quad (2.8)$$

onde o erro é uma seqüência branca e sua a matriz de covariância é dado por

$$\mathbf{P}[k|k-1] = E\{\mathbf{e}[k|k-1]\mathbf{e}^T[k|k-1]\} = E\{(\mathbf{x}[k] - \hat{\mathbf{x}}[k|k-1])(\mathbf{x}[k] - \hat{\mathbf{x}}[k|k-1])^T\}. \quad (2.9)$$

No instante de tempo  $k$ , a medição sobre o sistema  $\mathbf{z}[k]$  é utilizada para melhorar a estimativa *a priori* por meio da seguinte relação linear ponderada,

$$\hat{\mathbf{x}}[k|k] = \hat{\mathbf{x}}[k|k-1] + \mathbf{K}[k] (\mathbf{z}[k] - \mathbf{H}[k]\hat{\mathbf{x}}[k|k-1]), \quad (2.10)$$

onde  $\hat{\mathbf{x}}[k|k]$  é a estimativa atualizada, levando em consideração o vetor de observação  $\mathbf{z}[k]$ , e  $\mathbf{K}[k]$  consiste em um fator de ponderação que determina a importância dada entre a observação e a estimação obtida do modelo.

O problema agora está na determinação do fator de ponderação  $\mathbf{K}[k]$ , de tal modo que ajuste a estimativa do vetor de estados em um senso ótimo. Utilizando o erro mínimo médio quadrático como critério de estimação, primeiramente define-se a matriz de covariâncias do erro *a posteriori*

$$\mathbf{P}[k|k] = E\{(\mathbf{x}[k] - \hat{\mathbf{x}}[k|k])(\mathbf{x}[k] - \hat{\mathbf{x}}[k|k])^T\}. \quad (2.11)$$

Substituindo (2.6) em (2.10) e alterando a expressão de  $\hat{\mathbf{x}}[k|k]$  em (2.11) têm-se que

$$\begin{aligned} \mathbf{P}[k|k] = E\{ & [(\mathbf{x}[k] - \hat{\mathbf{x}}[k|k]) - \mathbf{K}[k] (\mathbf{H}[k]\mathbf{x}[k] + \mathbf{v}[k] - \mathbf{H}[k]\hat{\mathbf{x}}[k|k])] \\ & [(\mathbf{x}[k] - \hat{\mathbf{x}}[k|k]) - \mathbf{K}[k] (\mathbf{H}[k]\mathbf{x}[k] + \mathbf{v}[k] - \mathbf{H}[k]\hat{\mathbf{x}}[k|k])]^T\}. \end{aligned} \quad (2.12)$$

Lembrando que  $\mathbf{e}[k|k-1] = \mathbf{x}[k] - \hat{\mathbf{x}}[k|k-1]$  é decorrelacionado da incerteza  $\mathbf{v}[k]$ , pode-se representar a matriz de covariância da seguinte forma

$$\mathbf{P}[k|k] = (\mathbf{I} - \mathbf{K}[k]\mathbf{H}[k]) \mathbf{P}[k] (\mathbf{I} - \mathbf{K}[k]\mathbf{H}[k])^T + \mathbf{K}[k]R[k]\mathbf{K}[k]^T, \quad (2.13)$$

onde  $\mathbf{I}$  é uma matriz identidade.

O valor ótimo de  $\mathbf{K}[k]$  será aquele que minimiza o traço da matriz de covariância  $\mathbf{P}[k|k]$ . A diagonal da matriz é formada pelas variâncias dos erros de estimação para os elementos de vetor de estados  $\mathbf{x}[k]$ . Partindo do princípio que a minimização dos erros médio quadrático de cada termo da matriz, minimiza o erro total [Brown e Hwang 1997], o traço de  $\mathbf{P}[k|k]$  pode ser diferenciado em relação à  $\mathbf{K}[k]$

$$\frac{\partial \text{tr} \mathbf{P}[k|k]}{\partial \mathbf{K}[k]} = -2 (\mathbf{H}[k]\mathbf{P}[k|k-1])^T + 2\mathbf{K}[k] (\mathbf{H}[k]\mathbf{P}[k|k-1]\mathbf{H}[k]^T + R[k]). \quad (2.14)$$

Igualando (2.13) a zero, obteremos  $\mathbf{K}[k]$ , denominado como *ganho de Kalman*:

$$\mathbf{K}[k] = \mathbf{P}[k|k-1]\mathbf{H}[k]^T (\mathbf{H}[k]\mathbf{P}[k|k-1]\mathbf{H}[k]^T + R[k])^{-1}. \quad (2.15)$$

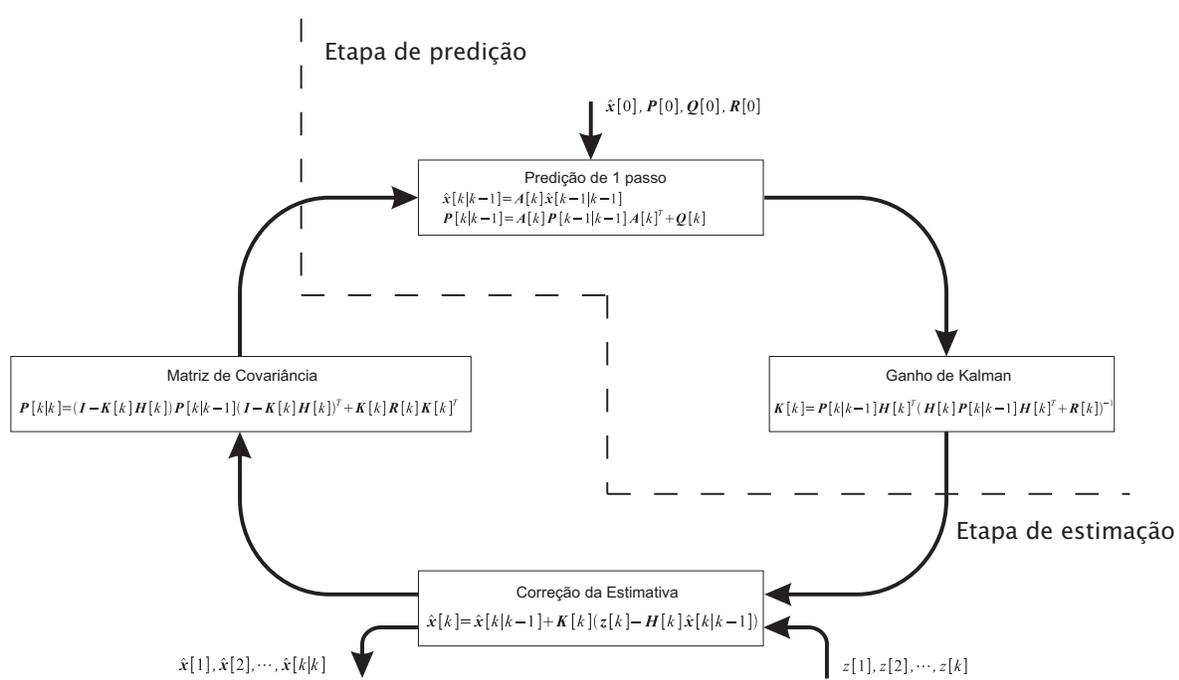


Figura 2.4: Diagrama em blocos que mostra o funcionamento do laço de estimação do filtro de Kalman. Com base nos parâmetros iniciais  $\hat{\mathbf{x}}[0], \mathbf{P}[0], \mathbf{Q}[0], \mathbf{R}[0]$ , o sistema inicia o processo recursivo, dependente somente das relações de transformações e amostras passadas. Fonte: [Brown e Hwang 1997]

Com o cálculo de  $\mathbf{K}[k]$  considera-se a medição  $\mathbf{z}[k]$  para estimação de  $\mathbf{x}[k]$ . Para o próximo instante de tempo  $k + 1$ , faz-se a predição do vetor de estados  $\hat{\mathbf{x}}[k + 1|k]$  baseado na matriz de transição  $\mathbf{A}[k]$

$$\hat{\mathbf{x}}[k + 1|k] = \mathbf{A}[k]\hat{\mathbf{x}}[k|k]. \quad (2.16)$$

O erro é obtido a partir da relação *a priori*

$$\mathbf{e}[k + 1|k] = \mathbf{A}[k]\mathbf{e}[k|k] + \mathbf{w}[k], \quad (2.17)$$

e a matriz de covariância é expressa por

$$\mathbf{P}[k + 1|k] = E\{\mathbf{e}[k + 1|k]\mathbf{e}[k + 1|k]^T\} = \mathbf{A}[k]\mathbf{P}[k|k]\mathbf{A}[k]^T + \mathbf{Q}[k]. \quad (2.18)$$

As equações (2.10), (2.13), (2.15), (2.16) e (2.18) são as equações recursivas do filtro de Kalman. Uma vez que o processo de estimação é iniciado, é executado por quanto tempo for necessário. A Figura 2.4 mostra o fluxograma do filtro durante um dado instante de tempo  $k$ .

### 2.3.4 Modelo de evolução dos coeficientes do processo AR

Para descrever a evolução temporal dos coeficientes do processo AR de ordem  $m$ , a equação que descreve o processo de observação é modificada para construção de um traço escalar  $z[k]$ , composta por uma componente de registro

$$z[k] = \mathbf{H}[k]\mathbf{x}[k] + v[k], \quad (2.19)$$

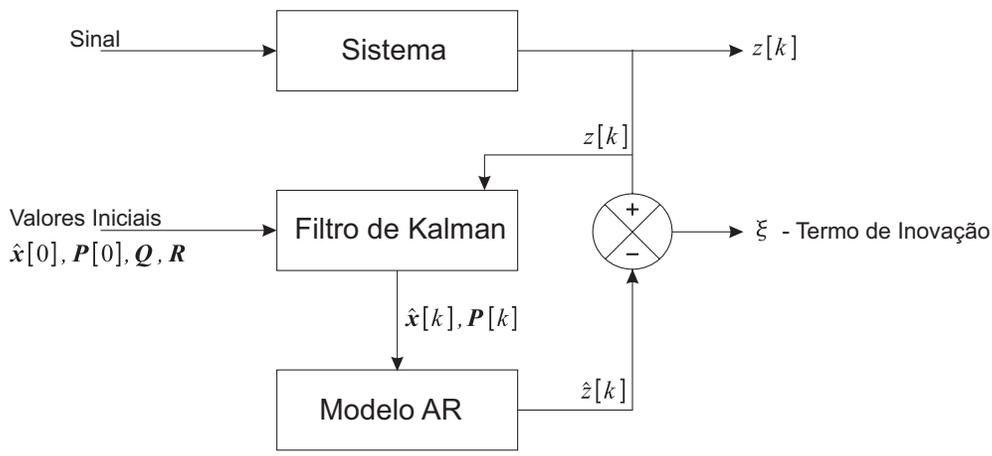


Figura 2.5: Diagrama em blocos de atuação do filtro de Kalman para problemas de estimação recursiva. O termo de inovação  $\epsilon$  é utilizado para avaliar as diferenças entre o valor real e o estimado pelo filtro.

onde  $\mathbf{H}[k]$  é um vetor  $1 \times N$  de conexão entre o sismograma e o vetor de estados  $N \times 1 \mathbf{x}[k]$ . A incerteza  $v[k]$  é uma seqüência branca escalar, decorrelacionada com a incerteza considerada para o modelo de estimação  $w[k]$ .

Em um processo de identificação recursiva, o filtro de Kalman atua paralelamente ao sistema, gerando estimativas a partir do modelo de evolução considerado, ajustando sua performance baseado nas amostras disponibilizadas na saída do sistema. Figura 2.5 mostra um diagrama em blocos que descreve como o filtro é utilizado nos casos de identificação recursiva.

Note que o filtro necessita apenas da amostra inicial  $(x[0], P[0])$  para iniciar o processo de estimação. Como dito anteriormente, as medições efetuadas na saída do sistema servem como base para o filtro efetuar correções efetuadas na etapa de predição. As medidas observadas  $z[k]$  e estimadas  $\hat{z}[k]$  são comparadas através do termo de inovação  $\epsilon_z[t]$ . Esse termo é utilizado para determinar a ocorrência de um distúrbio entre sistema e modelo, o que poderia ser considerado como a chegada de um evento.

O modelo utilizado para descrever a evolução dos coeficientes AR leva em conta seu valor e variação de primeira ordem ao longo do tempo  $k$ . Em sistemas discretos, a evolução temporal dos coeficientes é representada por

$$\begin{aligned}
 a_1[k] &= a_1[k-1] + T_a \dot{a}_1[k-1] + w_1[k], \\
 a_2[k] &= a_2[k-1] + T_a \dot{a}_2[k-1] + w_2[k], \\
 &\vdots \\
 a_m[k] &= a_m[k-1] + T_a \dot{a}_m[k-1] + w_m[k],
 \end{aligned}
 \tag{2.20}$$

onde  $T_a$  é o período de amostragem das medições e  $w_m[k]$  é uma seqüência i.i.d. Gaussiana que representa a incerteza do modelo de evolução do  $m$ -ésimo coeficiente AR. O termo  $\dot{a}_m[k-1]$  é a

diferença de primeira ordem e possui variação constante

$$\begin{aligned}
\dot{a}_1[k] &= \dot{a}_1[k-1] + w_{m+1}[k], \\
\dot{a}_2[k] &= \dot{a}_2[k-1] + w_{m+2}[k], \\
&\vdots \\
\dot{a}_m[k] &= \dot{a}_m[k-1] + w_{2m}[k].
\end{aligned} \tag{2.21}$$

O processo de estimação leva em consideração a evolução dos coeficientes  $a_m[k]$  e sua variação temporal  $\dot{a}[k]$ . Conhecido como sistema de evolução de ordem 1, o vetor de estados  $\mathbf{x}[k]$  é descrito da seguinte forma

$$\mathbf{x}[k] = \left[ a_1[k] \ a_2[k] \ \dots \ a_m[k] \ \dot{a}_1[k] \ \dot{a}_2[k] \ \dots \ \dot{a}_m[k] \right]^T, \tag{2.22}$$

onde  $a_1[k], a_2[k], \dots, a_m[k]$  são os coeficientes do modelo AR de ordem  $m$ , e  $\dot{a}_1[k], \dot{a}_2[k], \dots, \dot{a}_m[k]$  representam sua variação.

A matriz de transição de estados, obtida a partir das considerações feitas em (2.22), (2.20) e (2.21), é quadrada com tamanho  $2m \times 2m$  e representada de acordo com (2.5)

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 & T_a & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & \dots & 0 & 0 & T_a & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 1 & 0 & 0 & \dots & T_a \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix}. \tag{2.23}$$

As incertezas  $\mathbf{w}[k]$  relacionadas ao modelo de estimação/evolução

$$\mathbf{w}[k] = \left[ w_1[k] \ w_2[k] \ \dots \ w_{2m}[k] \right]^T. \tag{2.24}$$

O vetor que relaciona as estimativas do sistema de identificação com a amostra do traço sísmico  $z[t]$ , utiliza  $m$  amostras passadas de forma a adequar-se à representação de um modelo AR. As posições referentes às variações dos coeficientes no vetor de estados  $\mathbf{x}[k]$  não são levados em conta na representação do sismograma. Baseado no modelo de medição em (2.6), a forma de  $\mathbf{A}[k]$  implica em

$$\mathbf{H}[k] = \left[ \underbrace{z[k-1] \ \dots \ z[k-m]}_m \ \underbrace{0 \ \dots \ 0}_m \right]. \tag{2.25}$$

### 2.3.5 Determinação das incertezas associadas

É cediço que o filtro de Kalman assume o conhecimento das características estatísticas das incertezas  $\mathbf{w}[k]$  e  $v[k]$  para determinação de  $R[k]$  e  $\mathbf{Q}[k]$ . O conhecimento das incertezas associadas ao modelo de estados e observação, são importantes na performance do filtro de Kalman. Caso algum desses fatores seja dimensionado de forma incorreta, estimativas polarizadas serão calculadas

pelo filtro, levando à inevitável divergência ao longo do tempo, acarretando em falha no processo de identificação [Jazwinski 1970]

Se o valor do vetor de incerteza  $\mathbf{Q}[k]$  for muito alto para o modelo considerado, a matriz de covariância  $\mathbf{P}[k|k-1]$  será maior do que seu valor real, aumentando diretamente o ganho de Kalman. Nesse caso,  $\mathbf{K}[k]$  faria com que o filtro ficasse mais confiante nas observações  $z[k]$  em comparação às predições  $\hat{\mathbf{x}}[k|k-1]$ . Caso ocorresse o contrário, ou seja, se  $R[k]$  fosse muito maior do que seu valor original, o ganho de Kalman diminuiria. Isso faria o filtro considerar as estimativas do vetor de estados mais precisas do que as observações efetuadas sobre o sistema. Esses fenômenos são conhecidos como falta/excesso de confiança do filtro, fazendo com que as predições sejam realizadas de forma “cega”, ou seja, sem ajustar seus parâmetros com base nas estimativas passadas e observação do sistema real. A má determinação de ambos parâmetros prejudica o processo de identificação do filtro, levando-o à divergência.

Devido à dificuldade em determinar o parâmetro de confiança  $\mathbf{Q}[k]$ , seu valor é definido *a priori* e invariante no tempo. Esse valor deve ser fornecido pelo usuário de acordo com as propriedades estatísticas do vetor de estados do filtro de Kalman. Sua determinação deve seguir a “arte” de ajuste do filtro Kalman, onde, baseado nos diversos resíduos de estimação, busca-se o melhor valor que condiz com o modelo proposto.

A determinação de  $R$  baseia-se na técnica do operador da quarta diferença, proposta por [Noriega e Pasupathy 1992], efetuada no início do processo de estimação. Esse operador é considerado como ferramenta capaz de realçar o ruído em séries temporais discretas.

Considere uma seqüência  $\{z_N[k], k = 0, 1, \dots, N-1\}$  retiradas de um traço sísmico. A  $i$ -ésima diferença de  $z_N[k]$  é definida da seguinte forma recursiva:

$$\begin{aligned} D_1\{z_N[k]\} &= z_N[k] - z_N[k-1] \\ D_i\{z_N[k]\} &= D_{i-1}\{z_N[k]\} - D_{i-1}\{z_N[k-1]\}. \end{aligned} \tag{2.26}$$

Esse operador consiste em uma seqüência no formato “dente de serra” com amplitude  $16^*A$  [Noriega e Pasupathy 1992],. Para evitar que as saídas fiquem muito próximas do valor nulo, as amostras de observação são divididas por um fator de 16 vezes. A estimativa *a priori* de  $R$  consiste na seguinte média da série temporal contaminada somente por ruído

$$R = \frac{1}{256N} \sum_{k=0}^{N-1} \left[ z[k] - 4z[k-1] + 6z[k-2] - 4z[k-3] + z[k-4] \right]^2, \tag{2.27}$$

onde  $Z_i[k] = Z_i[0]$ , para  $k < 0$ .

### 2.3.6 Determinação da primeira quebra

O procedimento de identificação do instante de chegada, parte de teste estatístico que, a partir do termo inovação fornecido pelo filtro, verifica se as propriedades da amostra do traço sísmico no instante  $k$ , correspondem às estimativas do modelo AR previstas, dado a disponibilidade da amostra passada  $k-1$ . Caso o teste falhe, assume-se que a amostra atual corresponde à chegada da fase primária do evento.

Para um filtro ótimo, o termo de inovação  $\xi[k] = z[k] - \mathbf{H}[k]\hat{\mathbf{x}}[k|k-1]$  é uma seqüência de ruído branco [Mehra 1970]. Em processos de identificação de sistemas, qualquer perturbação no termo de inovação que descaracterize sua Gaussianidade, pode ser interpretada como uma mudança significativa em seu comportamento. Aplicado ao processo de evolução dos coeficientes AR para o ruído sísmico de fundo, essa alteração no termo de inovação implicaria na provável chegada de um evento.

A heurística adotada para identificação de algum distúrbio na seqüência do termo de inovação, utiliza a hipótese probabilística qui-quadrática por meio da distância de Mahalanobis [Duda e Stork 2000]. Em seqüências caracterizadas por distribuições normais, essa distância é uma medida natural que indica, em um senso probabilístico, o quanto a observação do sistema  $z[k]$  é compatível com o modelo estimado pelo sistema de evolução da filtragem recursiva.

Se considerarmos uma variável aleatória escalar  $\xi \sim N(0, \sigma_\xi^2)$ , uma amostra  $\xi[k]$ , proveniente da distribuição de  $\xi$ , possui 95% de passar no teste se

$$\xi[k]^2/\sigma_\xi^2 < d, \quad (2.28)$$

com  $d = 3,84$ .

A variância do termo de inovação possui a seguinte forma:

$$\sigma_\xi^2 = R[k] + \mathbf{H}[k]\mathbf{P}[k|k-1]\mathbf{H}[k]^T. \quad (2.29)$$

A não aprovação no teste pela hipótese qui-quadrada é resultado da incompatibilidade entre a observação do sistema e o modelo de evolução. Isso significa que existe grande probabilidade de que no instante de falha do teste, ocorra a chegada da primeira quebra (P) do evento sísmico.

### 2.3.7 Pós-processamento

O processo continuado de estimação da evolução do modelo AR para ruído de fundo permite sua adaptação às lentas mudanças do nível no traço sísmico. Um exemplo dessa influência é a temperatura, que insere oscilações de baixa freqüência de acordo com a hora dia, ou até mesmo com as estações climáticas. Esse tipo de interferência torna pouco prático o uso de qualquer método de comparação direta do traço sísmico com limiares constantes. Por se adaptar às mudanças nas características do ruído de fundo causadas por oscilações de baixa freqüência, o método de estimação se apresenta como uma solução automática, sem que seja preciso qualquer tipo de intervenção no comportamento dos traços.

Variações espúrias de alto conteúdo espectral (*sipkes*), no entanto, podem ser interpretados como um distúrbio na seqüência do termo de inovação  $\xi[k]$  do filtro de Kalman. Se isso for verificado, o filtro entenderia que aquele distúrbio é a chegada de um evento sísmico, gerando falso positivo no processo de identificação.

A principal característica de um *spike* é que, comparando-se com o modelo de evolução do ruído de fundo, os valores das amostras da seqüência do termo de inovação serão elevados por um curto espaço de tempo. Os valores da seqüência de  $\xi[k]$  depois da chegada do evento permanecem

elevados até seu fim. A Figura 2.6 mostra um exemplo do traço sísmico com *spikes* (A) e a distância de Mahalanobis estimada (B).

Partindo dessa premissa, após a identificação de algum distúrbio na seqüência de  $\xi[k]$ , continua-se o processo de estimação por tempo pré-determinado. Caso o valor da distância de Mahalanobis permaneça acima de 3,84, o processo é interrompido, e a chegada da fase é identificada como a primeira amostra que não passou no teste estatístico. Caso contrário, o algoritmo de identificação ignora o distúrbio, por considerá-lo como um provável falso positivo, e continua com o processo de estimação.

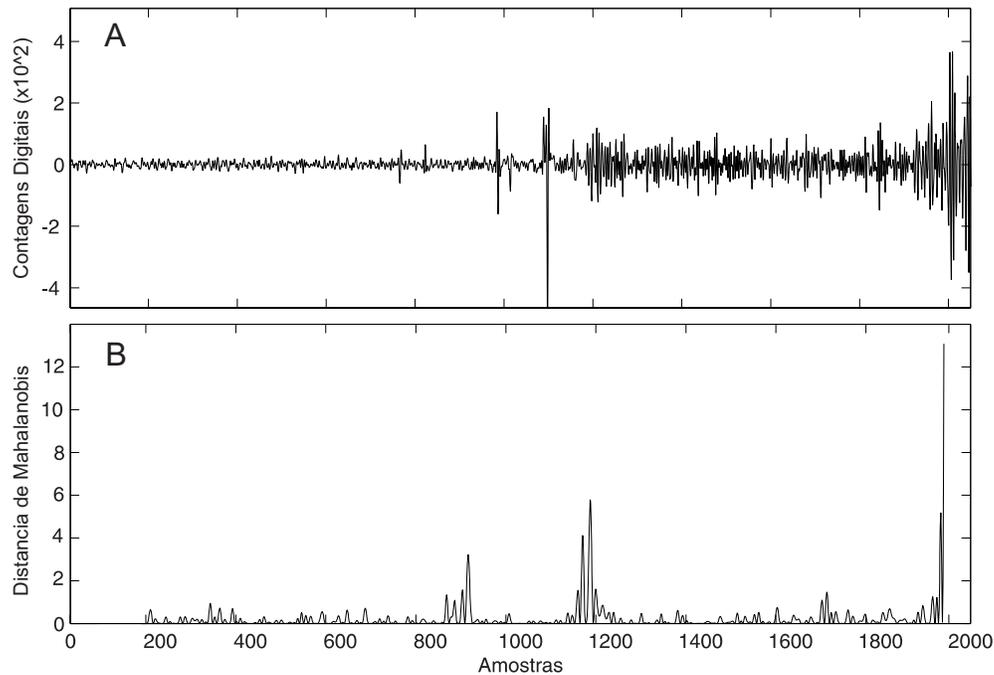


Figura 2.6: Traço sísmico (A) contaminado por variações espúrias de alta concentração espectral (*spikes*). Note que a ocorrência dos *spikes* alteram o processo de identificação, refletindo no valore da distância de Mahalanobis (B).

### 2.3.8 Processo de detecção em sismograma composto por traços de refração

Estudos de refração sísmica profunda utilizam sismogramas compostos por diversos traços sísmicos, posicionados ao longo de uma linha iniciada próxima a uma fonte explosiva, controlada, e com localização conhecida.

Devido a esse posicionamento no espaço, o tempo de chegada do evento está estritamente relacionado à distância entre a estação de registro e fonte sísmica. A partir dessa constatação, o processo de identificação não necessita estimar a evolução dos coeficientes para toda extensão de cada sismograma. Isso acarretaria em um tempo computacional desnecessário, dado que levantamentos dessa natureza utilizam linhas compostas por centenas de traços, na identificação de todas as primeiras quebras no sismograma.

Sendo assim, o processo de identificação realiza a busca a partir de um tempo inicial, definido pelo tempo de chegada identificado no sismograma mais próximo. O tempo é definido no início do processo e, caso a fase não seja detectada, mantém-se a amostra de início para o próximo traço. A Figura 2.7 mostra como esse procedimento é realizado no processo de detecção.

Ao fim da detecção em todos os traços do sismograma composto, o resultado será um vetor contendo o tempo identificado para cada traço da linha sísmica. Agregando as informações relativas à distância de cada traço em relação à fonte, tem-se a curva de tempo de trânsito para as primeiras chegadas, representadas pelo vetor  $Z = (x_j, t_j)^T$ .

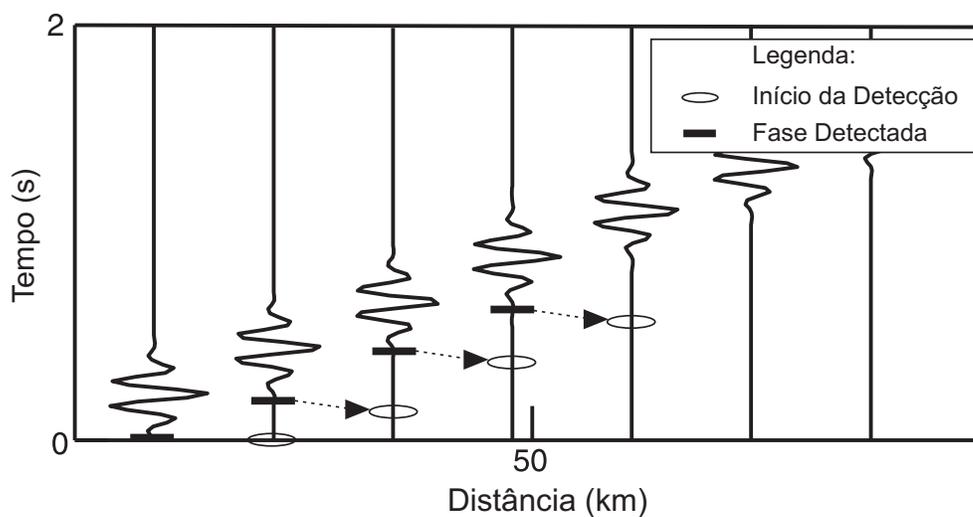


Figura 2.7: Detalhe do comportamento do algoritmo de detecção para sismogramas compostos da refração sísmica. A amostra de início da detecção de um traço no sismograma é definida pela detecção ocorrida no traço anterior, sem a necessidade de realizar o processo de identificação desde a amostra zero.

### 2.3.9 Resumo do algoritmo de detecção

O processo de identificação do tempo de chegada das primeiras quebras, baseado no rastreamento da evolução do modelo AR do ruído sísmico, pode ser resumido da seguinte forma:

Início do processo:  $Amostra\_inicio=0$ ; (Amostra inicial do processo de detecção de fase)

Declaração da variável  $Amostra\_busca$ ;

Declaração do vetor de tempos detectados:  $Tempo\_transito[1:Nro\_tracos] = 0$ ;

1. Para cada traço  $j = 1, 2, 3, \dots, Nro\_tracos$ , fazer:
2. Início do processo de estimação recursiva da evolução do modelo AR;
  - (a) Inicialização: dispõe-se de  $\hat{\mathbf{x}}[0]$ , da matriz  $\mathbf{P}[0]$ , da incerteza  $\mathbf{Q}$  e do período de aquisição  $T_a$ . A variável  $Amostra\_P = Amostra\_inicio$  é declarada.
  - (b) Para cada amostra  $k = 1, 2, \dots, K$ ,
    - i. Calcular  $R[k]$  (2.27);
    - ii. Montar o vetor  $\mathbf{H}[k]$  (2.25);
    - iii. Calcular  $\hat{\mathbf{x}}[k|k-1]$  usando (2.16);
    - iv. Calcular  $\mathbf{P}[k|k-1]$  usando (2.18);
    - v. Calcular o resíduo  
 $\xi[k] = Z[k] - \mathbf{H}[k]\hat{\mathbf{x}}[k|k-1]$ ;
    - vi. Determinar a distância de Mahalanobis  $d[k]$  do resíduo;  
$$d[k] = \frac{\xi[k]^2}{R[k] + \mathbf{H}[k]\mathbf{P}[k|k-1]\mathbf{H}[k]^T}$$
    - vii. Caso  $d[k] \geq 3.84$ :
      - A. Continua o processo de aquisição por  $J$  amostras;
      - B. Caso 80% dos valores de  $d[k : k + J] \geq 3.84$ : (Evento)
        - $Amostra\_P = k$ ;
        - Vai para o passo (c);
      - C. Caso 80% dos valores de  $d[k : k + J] < 3.84$ : (Spike)
        - Vai para o passo (viii);
    - viii. Calcular o Ganho de Kalman  $\mathbf{K}[k]$  usando (2.15);
    - ix. Calcular  $\hat{\mathbf{x}}[k|k]$  usando (2.10);
    - x. Calcular  $\mathbf{P}[k|k]$  usando (2.11);
  - (c) Fim do processo de estimação;
3. Caso  $Amostra\_P \neq 0$ :
  - $Amostra\_inicio = Tempo\_P - Amostra\_busca$ ;
  - $Tempo\_transito[j] = Amostra\_P \cdot T_a$ ;

Fim do Processo.

## 2.4 Considerações finais

Apesar do filtro estabelecer o completo conhecimento estatístico *a priori* das incertezas dos modelos de estado e observação, em muitas aplicações práticas esse quesito não é verificado dado a falta de informações necessárias para determinação concisa das incertezas.

Para contornar esse tipo de situação, existem algoritmos adaptativos propostos [Mehra 1970] de forma a identificar as incertezas ao longo do processo de estimação recursiva. Métodos como a correlação do termo de inovação ou casamento de covariâncias, tendem a apresentar estimativas das incertezas concisas com o modelo de forma adaptativa. Isso só pode ser realizado por meio de restrições impostas ao sistema, como alta independência linear dos modelos de estado e observação, e invariância no tempo das matrizes de estado  $\mathbf{A}[k]$ , e no vetor de relação  $\mathbf{H}[k]$ . Caso esses quesitos não sejam verificados, o filtro adaptativo não realizará a correta estimação das incertezas, levando-o à divergência.

Infelizmente essas restrições não são verificadas para o processo de identificação recursiva, devido à dependência linear das amostras passadas verificada no vetor de relação  $\mathbf{H}[k]$ . Esse vetor, além de não ser linearmente independente, é variante no tempo por depender de amostras passadas do traço sísmico.

Ao término do processo de identificação do tempo de chegada, passa-se para a etapa de classificação do grupo de fases referentes ao método de refração sísmica, onde são considerados os dados de primeira quebra para estudos da estrutura crustal. O resultado de todo processo de identificação de fases é disponibilizado na forma de curva de tempo de trânsito, utilizando os vetores resultantes da detecção do tempo de chegada e da distância do traço em relação à fonte sísmica controlada.

## Capítulo 3

# Classificação do tempo de trânsito das primeiras quebras em grupos de fases $P_g$ e $P_n$

### 3.1 Introdução

A identificação das primeiras quebras de um sismograma de refração profunda em grupos de fases  $P_g$  e  $P_n$  constitui o primeiro passo na obtenção do modelo crustal [Giese 1976]. Propriedades como inclinação do alinhamento das fases e distanciamento do ponto de tiro são empregados para calcular a velocidade da crosta superior e manto superior.

Grupo de fases é definido como pontos do sismograma composto onde não existe interrupção da curva de tempo de trânsito. A Figura 3.1 mostra as fases  $P_g$  e  $P_n$  no sismograma sintético. Para facilitar a identificação visual das fases, a técnica de redução do tempo é utilizada. No caso da figura 3.1, a velocidade de redução utilizadas foi de 7,0 km/s. Além da quebra do alinhamento das fases, a correlação entre as formas de onda (correlação de fase) pode ser utilizada para facilitar a classificação.

Para uma crosta homogênea e uniforme, as primeiras chegadas correspondem às ondas diretas ( $P_g$ ) e refratadas ( $P_n$ ) (Figura 3.1). Outros grupos aparecem como chegadas tardias misturadas com as codas <sup>1</sup> primárias.

Este capítulo apresenta o método para identificação e classificação de grupos de fases  $P_n$  e  $P_g$  da curva tempo de trânsito das primeiras quebras, em dados de refração sísmica profunda. O método utiliza o algoritmo de segmentação de retas *Split-and-Merge Fuzzy* para identificação dos alinhamentos dos tempos de trânsito. A classificação em grupos de fase é feita a partir do coeficiente angular dos segmentos extraídos. O intervalo de confiança do método é calculado a partir da propagação de incertezas durante o processo.

A seção 3.2 aborda as principais técnicas para detecção e extração de segmentos de retas em imagens bidimensionais. A seção 3.3 aborda a metodologia empregada para extração dos segmentos

---

<sup>1</sup>Coda é a definição dada à continuação da fase após sua chegada.

de retas, e a seção 3.4 trata da classificação dos grupos de fases a partir das chegadas das primeiras quebras. A seção 3.5 estabelece um paradigma para propagação de incertezas do método, e a seção 3.5.1 aborda considerações sobre o método apresentado e observações sobre a convergência do método e limitação dos grupos extraídos das primeiras chegadas.

## 3.2 Revisão Sobre Técnicas de Segmentação de Pontos

Não foi encontrado na literatura trabalhos que tratassem diretamente do problema de identificação automática do grupo de fases levando-se em consideração o tempo de trânsito das primeiras quebras. É sabido, no entanto, que métodos de segmentação em pontos bidimensionais encontram-se disponíveis em aplicações em engenharia.

Partindo dessa premissa, fez-se um apanhado sobre os principais algoritmos utilizados para extração e identificação automática de pontos transformados em segmentos de reta. Todos os algoritmos podem ser aplicados a estudos de refração sísmica profunda. Os métodos foram desenvolvidos, na sua grande maioria, para aplicações em robótica e processamento digital de imagens.

### 3.2.1 Rastreamento de Linha

O método de rastreamento de linha desenvolvido por [Siadat et al. 1997], realiza a segmentação de retas por meio de estimativas de um número pré-determinado de segmentos. Caso a distância entre um dado ponto no espaço for maior do que um limiar estabelecido  $T_{max}$ , este é considerado como quebra entre dois segmentos de reta. A partir dessa constatação, os parâmetros para os dois segmentos de reta são calculados e atualizados. A Figura 3.2A mostra como é feita a segmentação por rastreamento de linha.

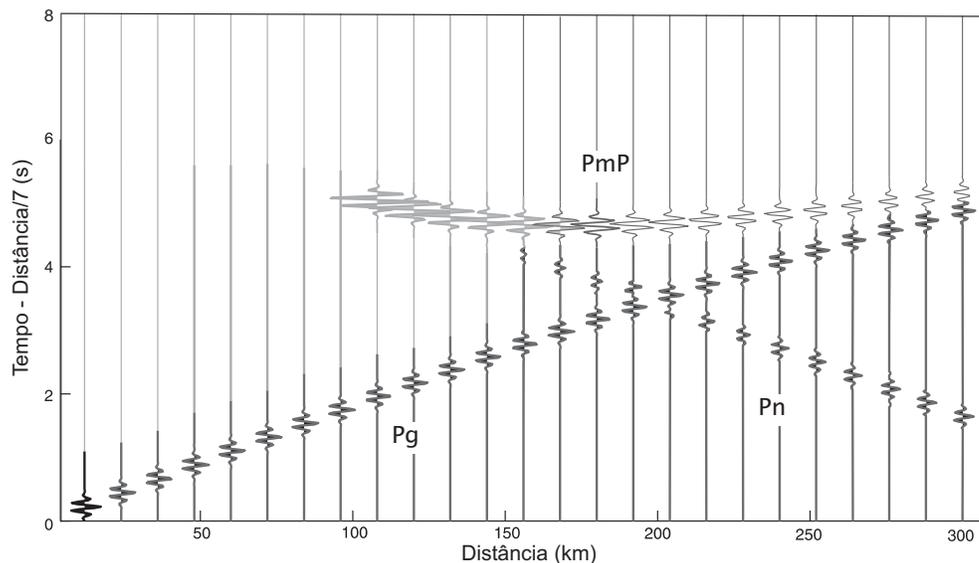
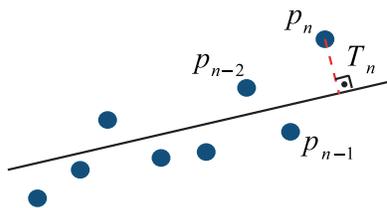


Figura 3.1: Sismograma sintético com os grupos de fase Pg e Pn, referentes às primeiras quebras, identificados.

### A) Rastreamento de Pontos



### B) Ajuste Iterativo de Pontos

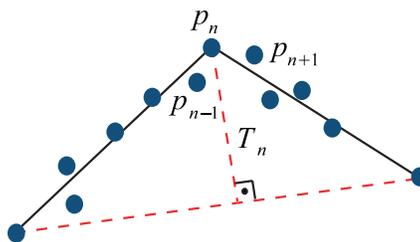


Figura 3.2: Exemplo gráfico dos métodos de extração de segmentos por Rastreamento de Linha (A) e Ajuste Iterativo de Pontos (B). (Fonte: [Borges e Aldon 2000])

Apesar de ser um algoritmo rápido e de baixo custo computacional, existe a dificuldade em escolher um limiar ideal  $T_{max}$  que atenda às especificações de todo o espaço do qual deseja-se extrair os segmentos. Segmentos curvos são considerados como uma única reta, pois os resíduos do segmento escolhido para rastreamento não são considerados. Este tipo de comportamento não é desejável em um algoritmo de extração de segmentos [Borges e Aldon 2000]. O rastreamento de linha pode ser sintetizado por meio da seguinte seqüência de instruções:

1. Inicia o algoritmo calculando um segmento de reta para os primeiros 2 pontos no espaço;
2. Adiciona mais um ponto ao modelo calculado no passo anterior;
3. Recalcula os parâmetros do segmento de reta;
4. Caso o novo parâmetro satisfaça a condição de linha  $T_{max}$ , volte para o passo 2;
5. Caso a condição não seja satisfeita, retira-se o último ponto e um novo parâmetro para reta é calculado.
6. Reinicia o algoritmo para os próximos 2 pontos, e volta para o passo 2.

### 3.2.2 Ajuste iterativo de ponto

Proposto por [Duda e Stork 2000], o ajuste iterativo de pontos é um método recursivo para extração de retas a partir de uma base de dados  $L$ . Dado os pontos de  $L = \{l_n, l_{n+1}, \dots, l_{nc}\}$ , o algoritmo divide a população em dois grupos  $L_1$  e  $L_2$  caso o critério de determinação da reta não for verificado. Repete-se o procedimento para os segmentos gerados até que o critério estabelecido seja satisfeito. A Figura 3.2B mostra um exemplo gráfico do algoritmo de ajuste iterativo de ponto.

Por apresentar baixo peso computacional e boa performance para extração de retas, os algoritmos de ajuste iterativo de pontos são utilizados em aplicações que envolvem determinação de retas. O algoritmo pode ser resumido da seguinte forma:

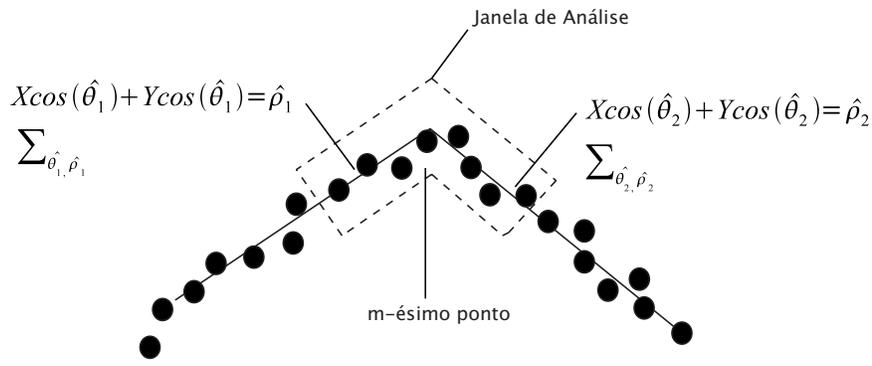


Figura 3.3: Exemplo gráfico do método de extração de segmentos por propagação de covariâncias. (Fonte: [Ji Qiang & Haralick 1998])

1. Início: Define-se um espaço  $s_1$ , composto por  $N$  pontos. Coloca-se  $s_1$  em uma lista  $L$
2. Calcula-se um segmento de reta para o próximo espaço  $s_i$  na lista  $L$ ;
3. Detecta-se um ponto  $P$  que possui a maior distância  $d_p$  para o segmento calculado;
4. Se  $d_p$  for menor que o limiar pré-estabelecido, vá para o passo 2;
5. Senão, divide-se  $s_i$  em dois segmentos  $s_{i1}$  e  $s_{i2}$  e a lista  $L$  é atualizada e vai para o passo 2.

### 3.2.3 Detecção de segmentos por propagação de covariâncias

[Ji Qiang & Haralick 1998] propôs uma aproximação estatística para detecção de pontos de quebra em uma seqüência de pontos no espaço. Para tanto, os autores consideram a quebra entre dois segmentos como ponto de vértice. O ponto de arco mais próximo do ponto de vértice será um ponto de quebra quando as orientações angulares dos segmentos considerados possuem significativa diferença estatística. A essência do método está na propagação de covariâncias, que possibilita a propagação das perturbações na estimação dos parâmetros da reta. A partir da diferenciação analítica da matriz de covariâncias dos pontos, emprega-se um teste de hipótese estatística para verificação do ponto de quebra.

O modelo de quebra consiste na divisão dos pontos  $S$  do espaço  $(x_n, y_n)$ , em dois segmentos  $S_1$  e  $S_2$ . Sejam  $\hat{\theta}_1$  e  $\hat{\theta}_2$  os ângulos de inclinação dos segmentos adotados e  $\hat{\theta}_{12} = |\hat{\theta}_1 - \hat{\theta}_2|$ . Dado um valor de limiar  $\theta_0$ , o problema pode ser definido na detecção da seguinte hipótese:  $H_0 : \hat{\theta}_{12} < \theta_0$  e  $H_1 : \hat{\theta}_{12} > \theta_0$ . O teste identifica o ponto de maior probabilidade de ocorrência do ponto de quebra. A falha do teste estatístico indica que as orientações angulares  $\hat{\theta}_1$  e  $\hat{\theta}_2$  possuem características diferentes, o que representaria o ponto de quebra. A Figura 3.3 mostra um exemplo do modelo de detecção.

As limitações do algoritmo são: i) apesar da invariância escalar na estimação dos parâmetros, o tamanho da janela de busca influencia no resultado. Dependendo do contexto espacial dos pontos utilizados, a janela necessita de ajustes para melhorar a performance do algoritmo; ii) a janela de busca precisa ser suficientemente grande para que as estimativas possuam algum significado

estatístico, e iii) o método não se mostra eficiente na detecção de pontos que representariam segmentos curvos, como um círculo, por exemplo.

### 3.2.4 Transformada de Hough

A Transformada de Hough consiste em metodologia empregada na segmentação de pontos em imagens de intensidade [Nguyen et al. 2005]. Entretanto, quando adaptado para extração de linhas em imagens de robôs móveis, apresenta as seguintes desvantagens:

- Dificuldade o intervalo de varredura apropriado;
- A Transformada de Hough, em sua forma básica, não leva em consideração perturbações e incertezas associadas à estimação dos parâmetros de reta.

O algoritmo de segmentação utilizando a Transformada de Hough pode ser sintetizado da seguinte forma:

1. Início: Monta-se um vetor composto por  $N$  pontos;
2. Inicializa o vetor acumulador (modelo de espaço);
3. Os valores do vetor são calculados;
4. Escolhe-se o elemento com o maior valor do vetor ( $V_{max}$ );
5. Se  $V_{max}$  for menor que o limiar, termina-se o processo;
6. Senão, monta-se um modelo interno (*inliers*);
7. Calcula e armazena o segmento de reta através dos *inliers*;
8. Os *inliers* são removidos da base de dados, e volta para o passo 2.

## 3.3 Extração de segmentos de reta da curva de tempo de trânsito pelo algoritmo SMF

### 3.3.1 Parametrização e organização dos segmentos de reta extraídos

Após a definição da curva de tempo de trânsito como pontos localizados no eixo espaço *versus* tempo, é necessário a adoção de um paradigma para extração e organização dos segmentos de reta nos grupos de fase classificados.

Este trabalho adotou o mesmo paradigma proposto por [Borges e Aldon 2000], onde cria-se uma lista de segmentos de reta extraídos  $\mathcal{L} = \{\mathbf{l}_k | k = 1, \dots, N_{\mathcal{L}}\}$  atualizada à medida em que o algoritmo de extração de retas for executado. Cada componente da lista  $\mathcal{L}$  é composto por um vetor de parâmetro de reta  $\mathbf{l}_k$  dado por

$$\mathbf{l}_k = (\rho_k, \alpha_k, \mathbf{C}_k, \bar{x}_k, \bar{t}_k, \mathbf{q}_k, \mathbf{u}_k), \quad (3.1)$$

onde  $\rho_k$  e  $\alpha_k$  representa o  $k$ -ésimo segmento de reta em coordenadas polares e  $\rho_k \geq 0$  e  $0 \leq \alpha_k \leq 2\pi$ ,  $\mathbf{C}_k$  é a matriz de covariância associada ao vetor  $(\rho_k, \alpha_k)^T$ . O centro de gravidade do segmento de reta é representado pelo ponto  $(\bar{x}_k, \bar{t}_k)$ , e o vetor de suporte  $\mathbf{q}_k$  contém todos os pontos da curva de tempo de trânsito correspondente ao  $k$ -ésimo segmento de reta extraído. O vetor  $\mathbf{u}_k$  contém os pesos que determinam o grau de similaridade dos pontos  $\mathbf{q}_k$ .

A tarefa de dividir e organizar os segmentos de reta é de responsabilidade do algoritmo de extração de reta. Assim como o algoritmo adotado neste trabalho, métodos abordados na seção 3.2 podem ser utilizados para essa tarefa. Note que o vetor de pontos  $\mathcal{Z}$  representa a curva de tempo de trânsito no eixo espaço *versus* tempo, enquanto a parametrização dos segmentos, e o modo de trabalho dos algoritmos abordam a problemática em coordenadas polares. O emprego de coordenadas polares simplifica computacionalmente a extração dos segmentos devido à simplicidade na representação de retas.

### 3.3.2 Base de extração dos segmentos de reta

Para trabalhar com pontos na forma de coordenadas espaço *versus* tempo, os algoritmos de extração de reta adotam uma base, chamada de *kernel*, de forma a calcular e definir a função objetivo para atingir a melhor performance.

Essa base calcula os parâmetros de reta  $\rho_k$  e  $\alpha_k$ , buscando minimizar a seguinte função objetivo **J**:

$$\mathbf{J}_k(\rho_k, \alpha_k, \mathcal{Q}, \mathcal{U}) = \sum_{j|q_j=k} u_j^m d^2(x_j, t_j, \rho_k, \alpha_k), \quad (3.2)$$

onde  $d(x_j, t_j, \rho_k, \alpha_k)$  é uma função de distância ortogonal que relaciona os parâmetros da reta  $\mathbf{l}_k$  com os pontos da curva de tempo de trânsito investigados  $(x_j, t_j)$ . Essa função é definida como

$$d(x_j, t_j, \rho_k, \alpha_k) = \rho_k - x_j \cos(\alpha_k) - t_j \sin(\alpha_k). \quad (3.3)$$

A constante  $m$  é positiva e o vetor  $\mathcal{Q} = \{q_j, j = 1, \dots, N_C\}$  contém o índice para o segmento de reta analisado. O vetor  $\mathcal{U} = \{u_j, j = 1, \dots, N_C\}$  representa o peso associado para avaliar o grau de similaridade entre o ponto de busca e o segmento de reta investigado.

Da função objetivo definida em (3.2), os parâmetros do segmento de reta  $(\rho_k, \alpha_k)^T$  são calculados a partir da solução de  $\partial \mathcal{J}_k / \partial \rho_k = 0$  e  $\partial \mathcal{J}_k / \partial \alpha_k = 0$ . Como resultado tem-se que

$$\rho_k = \bar{x}_k \cos(\alpha_k) + \bar{t}_k \sin(\alpha_k), \quad (3.4)$$

$$\alpha_k = \frac{1}{2} \arctan \left( \frac{-2\bar{S}_{xtk}}{\bar{S}_{ttk} - \bar{S}_{xxk}} \right). \quad (3.5)$$

O termo  $(\bar{x}_k, \bar{t}_k)^T$  corresponde ao centro de gravidade do segmento de reta e suas coordenadas são definidas como

$$\bar{x}_k = \frac{\sum_{j|q_j=k} u_j^m x_j}{\sum_{j|q_j=k} u_j^m}, \quad \bar{t}_k = \frac{\sum_{j|q_j=k} u_j^m t_j}{\sum_{j|q_j=k} u_j^m}. \quad (3.6)$$

As autocorrelações  $\bar{S}_{xxk}$  e  $\bar{S}_{ttk}$  são representadas como

$$\bar{S}_{xxk} = \sum_{j|q_j=k} u_j^m (x_j - \bar{x}_k)^2, \quad \bar{S}_{ttk} = \sum_{j|q_j=k} u_j^m (t_j - \bar{t}_k)^2, \quad (3.7)$$

e a correlação cruzada  $\bar{S}_{xtk}$  entre  $x$  e  $t$ ,

$$\bar{S}_{xtk} = \sum_{j|q_j=k} u_j^m (x_j - \bar{x}_k)(t_j - \bar{t}_k). \quad (3.8)$$

De maneira semelhante, a matriz de covariância  $\mathbf{C}_k$  associada ao vetor de parâmetros de reta  $(\rho_k, \alpha_k)^T$  é derivada com base na função de custo em (3.2). Seu desenvolvimento é mostrado na seção 3.5, onde é discutida a propagação de incertezas da extração e classificação do algoritmo adotado.

### 3.3.3 Método *split-and-merge fuzzy* para extração de segmentos de reta

O algoritmo utilizado para extração dos segmentos de retas com base nas primeiras quebras, consiste na fusão de duas metodologias, uma para segmentação e outra para classificação. O método de segmentação funciona a partir da implementação da técnica de agrupamento difuso por protótipo (*prototype fuzzy clustering*), em um senso de divisão e fusão (*split-and-merge*).

Inicialmente proposto por [Borges e Aldon 2000], o principal objetivo do *Split-and-merge fuzzy* está na extração de segmentos de reta em imagens bidimensionais, adquiridas por sensores a laser em sistemas embarcados de navegação de robôs. Dentre suas vantagens, destaca-se a possibilidade do uso da técnica de *prototype fuzzy clustering* sem as restrições iniciais impostas pelo *fuzzy clustering*.

#### 3.3.3.1 Noções de técnicas de agrupamento

A classificação de padrões baseadas em técnicas de agrupamento, encaixa-se no caso de aprendizado ou realce das principais características da base de dados, feita de maneira não supervisionada [Theodoridis e Koutroumbas 2003]. O principal objetivo no emprego dessas técnicas encontra-se no “realce” das organizações ou características dos padrões em grupos (*clusters*), os quais permitem descobrir suas similaridades ou diferenças, e retirar conclusões sobre o espaço de dados utilizado.

Diversos ramos da ciência utilizam esse conceito sob diferentes denominações. Taxinomia numérica (biologia), tipologia (ciências sociais) e partição (teoria dos grafos) constituem alguns exemplos de técnicas de agrupamento. Agrupamento pode ser comparada com as atividades de classificação empregadas por seres humanos para processar um grande volume de informações. Armazená-las em grupos que possuem características similares torna-se uma tarefa indispensável.

Na maioria das técnicas de classificação os padrões são representados sob forma de características extraídas ou transformadas da base de dados. Os passos para aplicar as técnicas de agrupamento devem seguir os seguintes critérios [Theodoridis e Koutroumbas 2003]:

- Seleção das características;

- Medidas de proximidade;
- Critério de agrupamento;
- Algoritmo de agrupamento;
- Validação dos resultados;
- Interpretação dos resultados.

Dentre os algoritmos de agrupamento utilizados, destacam-se os que empregam métodos seqüenciais, hierárquicos, probabilísticos e baseados em minimização de função objetivo. Os algoritmos de agrupamento que visam a minimização da função de custo  $J$ , valem-se de técnicas que utilizam cálculo diferencial parametrizado em termos de um parâmetro  $\beta$ .

### 3.3.3.2 Algoritmo de agrupamento difuso por protótipo

Diferentemente dos algoritmos de agrupamento, o agrupamento difuso por protótipo diferencia-se por não depender de casos como compactação ou a forma do grupo a partir dos dados. A característica que o diferencia de outros métodos, baseia-se no esquema difuso em que um vetor pertence a mais de um grupo, enquanto cada vetor pertence somente a um grupo em outros métodos.

O principal objetivo da maioria dos métodos de agrupamento difuso por protótipo está na redução da seguinte função de custo  $J$  [Davé e Krishnapuram 1997]

$$J(\beta_k, \mathcal{U}, \mathcal{Z}) = \sum_{k=1}^C \sum_{j=1}^N u_{kj}^m d^2(x_j, t_j, \beta_k), \quad (3.9)$$

em relação ao vetor de parâmetro  $\beta$  e  $\mathcal{U}$ , sujeito às restrições

$$\sum_{j=1}^N u_{kj} = 1, \quad k = 1, \dots, C, \quad (3.10)$$

onde

$$u_{kj} \in [0, 1], \quad k = 1, \dots, C, \quad j = 1, \dots, C \quad (3.11)$$

$$0 < \sum_{k=1}^C u_{kj} < N, \quad j = 1, 2, \dots, N. \quad (3.12)$$

Para a equação (3.9),  $\beta_k$  é o vetor protótipo de representação do  $k$ -ésimo grupo,  $\mathcal{U}$  é uma matriz  $C \times N$  nos quais os  $(k, j)$  elementos representam o grau de similaridade entre  $(x_j, t_j)^T$  e  $\beta_k$ , e  $m (> 1)$  é um parâmetro conhecido como *fuzzifier*.

No caso de extração de segmentos de reta, o protótipo  $\beta$  adota uma representação mais compacta. Essa representação é dada por  $\beta = \{(\rho_k, \alpha_k)^T | k = 1, \dots, C\}$ , onde  $\beta_i$  representa o parâmetro em coordenadas polares do  $k$ -ésimo segmento de reta [Borges e Aldon 2000]. A função de distância  $d^2(x_j, t_j, \beta_k)$  é representada como

$$d^2(x_j, t_j, \beta_k) = f^2(x_j, t_j, \beta_k) + g^2(x_j, t_j, \beta_k), \quad (3.13)$$

onde  $f^2(x_j, t_j, \beta_k) = (\rho_k - x_j \cos(\alpha_k) - t_j \sin \alpha_k)$ , e  $g^2(x_j, t_j, \beta_k)$  é definida como função de penalidade para os pontos localizados longe do grupo. A função de penalidade é constante e possui a seguinte forma

$$g^2(x_j, t_j, \beta_k) = (x_j - \bar{x}_k)^2 + (t_j - \bar{t}_k)^2, \quad (3.14)$$

onde  $\bar{x}_k$  e  $\bar{t}_k$  são os centros de gravidade definidos na equação (3.6).

A minimização da função objetivo  $J(\beta_k, \mathcal{U}, \mathcal{Z})$ , em relação a  $\mathcal{U}$ , está sujeita às restrições de (3.10), e tem minimização associada ao multiplicador de Lagrange  $\lambda_k$

$$J(\beta_k, \mathcal{U}, \mathcal{Z}) = \sum_{k=1}^C \sum_{j=1}^N u_{kj}^m d^2(x_j, t_j, \beta_k) - \sum_{k=1}^C \lambda_k \left( \sum_{j=1}^N u_{kj} - 1 \right). \quad (3.15)$$

A derivada parcial de  $J(\beta_k, \mathcal{U}, \mathcal{Z})$  em relação a  $u_{kj}$  é

$$\frac{\partial J(\beta_k, \mathcal{U}, \mathcal{Z})}{\partial u_{kj}} = m u_{kj}^{m-1} d^2(x_j, t_j, \beta_k) - \lambda_k. \quad (3.16)$$

Igualando a equação (3.16) a zero, obtém-se

$$u_{kj} = \left( \frac{\lambda_k}{m \cdot d^2(x_j, t_j, \beta_k)} \right)^{\frac{1}{m-1}}, \quad j = 1, \dots, N. \quad (3.17)$$

Substituindo  $u_{kj}$  na equação (3.12) tem-se que

$$\lambda_k = \frac{m}{\left( \sum_{j=1}^N \left( \frac{1}{d^2(x_j, t_j, \beta_k)} \right)^{\frac{1}{m-1}} \right)^{m-1}}. \quad (3.18)$$

Combinando as equações (3.18) e (3.17), e manipulando-as algebricamente

$$u_{kj} = \frac{1}{\sum_{i=1}^N \left( \frac{d^2(x_j, t_j, \beta_i)}{d^2(x_j, t_j, \beta_k)} \right)^{\frac{1}{m-1}}}, \quad (3.19)$$

onde  $k = 1, \dots, C$  e  $j = 1, \dots, N$ .

A partir da base de dados  $\mathcal{Z}$ , do número de grupos  $C$  e do parâmetro de protótipo inicial  $\beta$ , o algoritmo de agrupamento difuso por protótipo pode ser resumido como [Borges e Aldon 2000]:

1.  $k = 0$  (contador de iterações)
2. Enquanto a função de custo para cada protótipo  $\beta_k$  for maior do que um valor estipulado *a priori* e  $k \leq kmax$ , **faça**:
  - Calcula  $u_{kj}$  para  $k = 1, \dots, C$  e  $j = 1, \dots, N$
  - Calcula  $\beta_k$  para  $k = 1, \dots, C$
3. Fim do processo

Contudo, o algoritmo de agrupamento difuso por protótipo apresenta as seguintes desvantagens:

- *Sensibilidade à escolha do protótipo inicial  $\beta$ .* A performance do método apresenta forte dependência com o primeiro protótipo escolhido para iniciar o processo de extração do segmento de reta. Caso não seja escolhido um parâmetro correto, são grandes as chances do algoritmo ficar preso dentro de um mínimo local no espaço de soluções [Davé e Krishnapuram 1997].
- *Não robustez à pontos muitos distantes.* Em geral, recomenda-se a utilização do algoritmo para grupos mais compactos [Davé e Krishnapuram 1997]. Dessa forma, o mínimo alcançado na função objetivo seria a solução mais "válida".
- *O número de grupos deve ser conhecido a priori.* Três principais fatores justificam essa desvantagem. Primeiro, o agrupamento deve ser feito para cada valor do grupo  $C$  considerado. Se não existir um número definido de grupos, um grande volume computacional poderá ser requisitado. Segundo, para cada valor de  $C$ , não há garantias de que o valor mínimo da função objetivo é ótimo. Terceiro, os testes de validação dos grupos não são confiáveis, principalmente se o espaço de dados estiver contaminado com ruído [Davé e Krishnapuram 1997].

### 3.3.3.3 O algoritmo *split-and-merge* aliado ao *prototype fuzzy clustering*

A aplicação do senso de divisão e fusão (*split-and-merge* - SMF) aparece como uma solução para contornar as principais restrições iniciais no emprego do método por agrupamento difuso. Seguindo a conotação, o método realiza as etapas de divisão e fusão para extração dos segmentos de reta. Sua principal vantagem encontra-se na não obrigatoriedade da determinação do número de grupos *a priori*.

A etapa de divisão foi inspirada no conceito abordado na seção 3.2.2 para extração por meio do ajuste iterativo de pontos. Neste método, para cada iteração, o espaço de pontos  $\mathcal{Z}$  é dividido em dois subgrupos  $\mathcal{Z}'$  e  $\mathcal{Z}''$ , caso o critério de dispersão não for respeitado. O critério utilizado respeita a seguinte função de dispersão quadrática com respeito ao protótipo  $k$

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{n|(x_n, t_n) \in \mathcal{Z}'} (\rho_k - x_n \cos(\alpha_k) - t_n \sin(\alpha_k))^2}{\sum_{n|(x_n, t_n) \in \mathcal{Z}'}}. \quad (3.20)$$

Se o critério  $\sigma \leq \sigma_{max}$  não for satisfeito, geram-se novos subgrupos até que o mesmo seja satisfeito. Critérios como número mínimo de pontos contidos em um grupo e fator de dispersão inicial  $\sigma_{max}$ , condizentes com o espaço de dados utilizados, são considerados para extração dos segmentos de reta. Ao fim do processo de extração, uma lista de segmentos  $L = \{\mathbf{l}_k | k = 1, \dots, N_L\}$ , onde  $N_L$  consiste no número de segmentos extraídos, é gerada. A etapa de divisão pode ser resumida na seguinte forma:

1. Início
  - (a)  $\mathcal{L}$  é inicialmente composto por uma linha ajustada aos pontos  $\mathcal{Z}$ , e  $N_L^0 = 1$ .
  - (b) Define número de geração  $m = 1$ ;
2. Atualiza o  $m$ -ésimo tamanho da lista de geração por  $N_L^m = N_L^{(m-1)}$ ;
3. Para cada segmento  $\mathbf{l}_k$ ,  $k = 1, \dots, N_L^{m-1}$ , que não satisfaça a condição  $\delta_k < \delta_{max}$ , faça:
  - (a) Dois novos segmentos são criados,  $\mathbf{l}'_k$  e  $\mathbf{l}''_k$ , baseados nos pontos de suporte de  $\mathbf{l}_k$  a partir da execução do algoritmo de extração por agrupamento difuso, com número de classes  $C = 2$ ;
  - (b) Substituir  $\mathbf{l}_k$  por  $\mathbf{l}'_k$  e adicionar  $\mathbf{l}''_k$  ao fim da lista  $\mathcal{L}$ ;
  - (c)  $N_L^{(m)} = N_L^{(m)} + 1$ ;
4. Se ainda existir algum segmento  $\mathbf{l}_k$ ,  $k = 1, \dots, N_L^{(m)}$ , que não satisfaça a condição  $\delta_k \leq \delta_{max}$ , vá para o passo 2;
5. Fim do processo.

A etapa de fusão consiste na junção de um segmento  $\mathbf{l}_k$  com seus grupos subsequentes, com objetivo de formar novos segmentos que se enquadre no critério de dispersão  $\sigma_{max}$ . Caso o critério seja verificado, a lista de segmentos  $L$  é atualizada até não ser possível realizar nenhuma fusão. A etapa de fusão pode ser resumida:

1. Para cada segmento extraído na etapa de divisão  $\mathbf{l}_k$ ,  $k = 1, \dots, N_L^{(m)}$ , escolhem-se os segmentos mais próximos  $\mathbf{l}_a$  e  $\mathbf{l}_b$  dois possíveis candidatos de fusão.
2. A fusão é feita gerando-se dois novos segmentos,  $\mathbf{l}_{ka} = [\mathbf{l}_k \mathbf{l}_a]$  e  $\mathbf{l}_{kb} = [\mathbf{l}_k \mathbf{l}_b]$ .
3. O segmento que apresentar o menor fator de dispersão, e que estiver dentro do critério  $\delta \leq \delta_{max}$  é considerado como um segmento  $\mathbf{l}_f$ . O segmento escolhido para agrupar-se com  $\mathbf{l}_k$  é removido da lista  $\mathcal{L}$  and  $N_L^{(m)} = N_L^{(m)} - 1$ .
4. Se existirem possíveis fusões de segmento, vá para o passo 1.
5. Fim do processo

Para demonstrar seu funcionamento, o SMF foi aplicado em uma base dados que simula uma curva de tempo de trânsito. Para uma região de 30 pontos e um fator de dispersão máximo  $\delta_{max} = 11$ , o SMF foi capaz de extrair 9 segmentos. O resultado gráfico do processo é mostrado na Figura 3.4. A curva foi reduzida em 7 km/s para facilitar a visualização. Note que devido ao baixo índice de dispersão dos dados, os segmentos 6 e 7 apresentaram o número de significância mínima de 3 pontos de suporte  $\mathbf{q}$ .

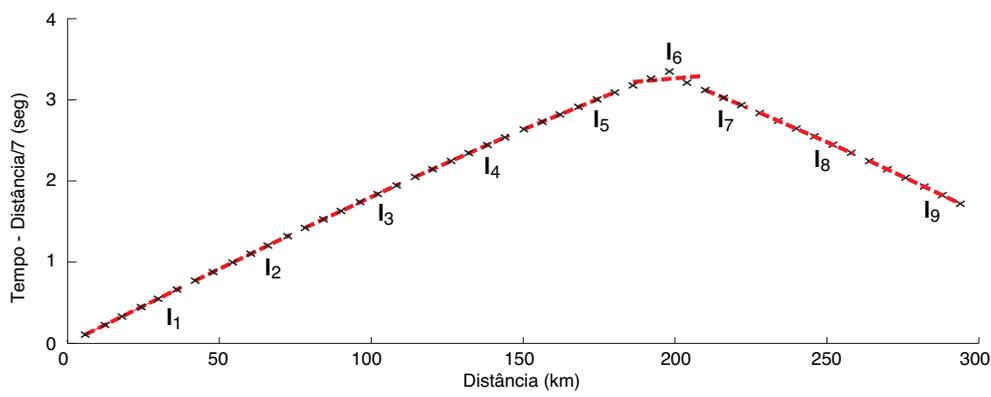


Figura 3.4: Exemplo de extração realizada pelo SMF em uma curva fictícia de tempo de trânsito. A base de dados  $\mathcal{Z} = (x_i, t_i)^T$  é representada pelos símbolos em “X”. Os traços pontilhados apontam os segmentos extraídos pelo SMF, com índice de dispersão máximo  $\delta_{max} = 11$ .

### 3.4 Classificação do grupo de fases

Após a construção da lista de segmentos de reta  $\mathcal{L}$ , passa-se para classificação dos grupos de fases presentes no tempo de trânsito das primeiras chegadas. Como já abordado na introdução deste trabalho (seção 1.4, do capítulo 1), os grupos fases nas primeiras quebras considerados neste trabalho serão os grupos Pg e Pn.

O grupo de fases diretas Pg caracteriza-se por ser o primeiro grupo a aparecer na curva de tempo de trânsito. Supondo uma crosta superior homogênea, a velocidade de propagação da Pg nesse meio situa-se entre 5,0 e 6,5 km/s [Christensen e Mooney 1995].

A declaração dada em [Giese 1976], considera o grupo de fases Pn como todas as ondas re-fracadas na descontinuidade de Moho. Sua principal característica é o brusco aumento da velocidade de propagação das ondas de corpo. Para as onda compressionais (P), esse valor varia entre 7,6 e 8,6 km/s. A partir das características de velocidade de propagação das ondas compressionais, deriva-se o método para classificação do grupo de fases.

A classificação entre os grupos é feita através do rastreamento da inclinação de cada segmento de reta  $I_k$ . O principal objetivo é a detecção dos pontos de mudança nos padrões. O coeficiente angular do segmento de reta dentro do tempo de trânsito pode ser interpretado como a vagarosidade do grupo de fase. A velocidade (em km/s) de propagação de um grupo de fases  $P_k$  é função inversa da vagarosidade, definida como

$$v_k = \frac{1}{a_k}, \quad (3.21)$$

onde

$$a_k = \frac{\sin(\alpha_k)}{\cos(\alpha_k)} \quad (3.22)$$

representa o termo de vagarosidade (em s/km) do segmento de reta em estudo.

A partir das definições de velocidade para cada grupo de fases, verifica-se a inclinação de cada segmento de reta na curva de tempo de trânsito. As velocidades são comparadas com os limites pré-estabelecidos para cada grupo, e os segmentos extraídos são agrupados de acordo com as classes possíveis.

Após a avaliação de cada segmento  $\mathbf{l}_k$ , as estimativas de inclinação calculadas são comparadas com a vagarosidade estabelecida para cada grupo de fase. Dessa forma os segmentos  $\mathbf{l}_k$ , provenientes do algoritmo SMF, são divididos em dois grupos: das fases Pg e Pn, identificados como  $\mathbf{l}_{Pg}$  e  $\mathbf{l}_{Pn}$ .

### 3.5 Propagação de incertezas do processo

A propagação das incertezas associadas ao processo, tem por objetivo inferir sobre o grau de confiabilidade do método de extração e classificação, dado a dispersão do espaço de dados utilizado. A determinação do intervalo de confiança é feita a partir de técnicas que utilizam os mesmos critérios adotados para extração dos segmentos de reta. Isso permite avaliar o comportamento do algoritmo utilizado com base nas perturbações existentes nos dados de entrada. Duas técnicas são utilizadas para determinação do intervalo confiança 3-sigma para extração e classificação do grupo de fases.

A primeira consiste no cálculo da matriz de covariância  $\mathbf{C}_k$  a partir da propagação aditiva de perturbações aleatórias proposto por [Haralick 1994]. O método é aplicado para propagar as perturbações relacionadas aos dados de entrada no domínio  $(x_j, t_j)^T$ , para as estimativas  $(\rho_k, \alpha_k)^T$ , em coordenadas polares, de modo a minimizar a função de custo definida em (3.2). Assume-se que a segunda derivada da função de custo possui valor finito e que as perturbações dos dados de entradas são compactas, possíveis de serem aproximadas por uma série de Taylor de primeira ordem [Haralick 1994]. A matriz de covariância  $\mathbf{C}_k$  é dada por

$$\mathbf{C}_k = \left( \frac{\partial \mathbf{g}_k}{\partial (\rho_k, \alpha_k)^T} \right)^{-1} \cdot (\Lambda_d + \Lambda_p) \cdot \left( \frac{\partial \mathbf{g}_k}{\partial (\rho_k, \alpha_k)^T} \right)^{-1}, \quad (3.23)$$

com  $\mathbf{g}_k = \frac{\partial J(\rho_k, \alpha_k, \mathcal{U}; \mathcal{Z})}{\partial (\rho_k, \alpha_k)^T}$  e

$$\Lambda_d = \sum_{j|q_j=k} \frac{\partial \mathbf{g}_k}{\partial d(x_j, t_j, \rho_k, \alpha_k)} \cdot \mathbf{C}_{d_k} \cdot \frac{\partial \mathbf{g}_k^T}{\partial d(x_j, t_j, \rho_k, \alpha_k)}, \quad (3.24)$$

$$\Lambda_p = \sum_{j|q_j=k} \frac{\partial \mathbf{g}_k}{\partial \mathbf{p}_j} \cdot \mathbf{C}_{p_j} \cdot \frac{\partial \mathbf{g}_k^T}{\partial \mathbf{p}_j}. \quad (3.25)$$

Na equação (3.24), a matriz de covariância  $\mathbf{C}_{d_k}$  trata dos resíduos estimados para os dados de entrada, modelando-os como variáveis aleatórias Gaussianas com média zero e covariância

$$\mathbf{C}_{d_k} = \frac{\mathbf{J}_k(\rho_k, \alpha_k, \mathcal{Q}, \mathcal{U})}{\sum_{j|q_j=k} u_j^m}. \quad (3.26)$$

O termo  $\mathbf{C}_{p_j}$  em (3.25), trata da matriz de covariância associada aos pontos do tempo de trânsito, observados em coordenadas polares

$$\mathbf{C}_{p_j} = \left( \begin{pmatrix} \cos(\alpha_j) \\ \sin(\alpha_j) \end{pmatrix} \right) \cdot (\cos(\alpha_j) \sin(\alpha_j)). \quad (3.27)$$

A segunda fase consiste no cálculo do intervalo de confiança 3-sigma em termos de coordenadas cartesianas  $(x, t)^T$ . Para tal, faz-se necessário a conversão dos resultados da matriz de covariância

obtida para as estimativas em coordenadas polares. A transformação de coordenadas é feita a partir da seguinte relação

$$\begin{bmatrix} x \\ t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \rho \cos(\alpha) \\ \rho \sin(\alpha) \end{bmatrix}. \quad (3.28)$$

A relação não-linear em (3.28) não recomenda a aplicação de métodos lineares de propagação de incertezas. A aplicação de técnicas de linearização não são capazes de fornecer estimativas consistentes sobre o intervalo de confiança. A Transformada *Unscented* foi definida para contornar o problema de propagação de incertezas em processos não lineares. A Transformada é utilizada para estimar as matrizes de covariância para os grupos de fases Pg e Pn.

Sua principal característica encontra-se no fato que é mais fácil aproximar uma função não linear pela sua distribuição de probabilidade, do que gerar pontos a partir dos parâmetros de entrada  $(\rho_k, \alpha_k)^T$  e da matriz de covariância  $\mathbf{C}_k$  [Durrant-Whyte 2000]. Para tanto, a função representada em (3.28) na forma vetorial  $(x, t)^T = \mathbf{f} [(\rho_k, \alpha_k)^T]$ , é utilizada para calcular os principais pontos de observação da distribuição de entrada. Só então a média e a matriz de covariância são calculadas. Apesar da viabilidade em considerar diversos tipos de distribuições de probabilidade, assume-se que o processo é caracterizado por uma distribuição Gaussiana.

Para um vetor de entrada  $n$ -dimensional  $\beta$ , com média  $\hat{\beta}_k$  e matriz de covariância  $\mathbf{C}_k$ ,  $2n + 1$  pontos de inflexão ponderados são selecionados [Durrant-Whyte 2000]

$$\begin{aligned} \beta_0 &= \hat{\beta}_k, \\ \mathbf{W}_0 &= \kappa / (n + \kappa) \\ \beta_i &= \hat{\beta}_k + \left( \sqrt{(n + \kappa) \mathbf{C}_k} \right), \\ \mathbf{W}_i &= 1/2(n + \kappa) \\ \beta_{i+n} &= \hat{\beta}_k - \left( \sqrt{(n + \kappa) \mathbf{C}_k} \right), \\ \mathbf{W}_{i+n} &= 1/2(n + \kappa), \end{aligned} \quad (3.29)$$

onde  $\kappa$  é a  $i$ -ésima linha ou coluna da matriz  $\sqrt{(n + \kappa) \mathbf{C}_k}$ , e  $\mathbf{W}$  o peso associado ao  $i$ -ésimo ponto. Dados os pontos gerados em (3.29), a propagação da média e da matriz de covariância é calculada da seguinte forma

$$\begin{aligned} (x, t)^T &= \mathbf{f} [(\rho_k, \alpha_k)^T] \\ (\hat{x}, \hat{y})^T &= \sum_{i=0}^{2n} \mathbf{W}_i \beta_i \\ \mathbf{C}_{xt} &= \sum_{i=0}^{2n} \{(x, t)^T - (\hat{x}, \hat{y})^T\} \times \{(x, t)^T - (\hat{x}, \hat{y})^T\}^T. \end{aligned} \quad (3.30)$$

A utilização da Transformada *Unscented* permite predições mais precisas e consistentes da média e da matriz de covariância, se comparado com resultados obtidos de processos de linearização. O processamento por meio de vetores e matrizes permitem que qualquer modelo de processo possa ser utilizado para estimação dos parâmetros.

### 3.5.1 Resumo do método para extração e classificação de grupos de fases a partir do tempo de trânsito

Ao final do processo de extração e classificação dos segmentos de reta, uma nova lista de linhas  $L = \{\mathbf{l}_f | f = P_g \text{ e } P_n\}$  é criada para cada um dos dois grupos de fase que aparecem na curva de tempo de trânsito. Cada linha  $\mathbf{l}_f$  contém as seguintes informações sobre os grupos de fase:

$$\mathbf{l}_f = (\hat{\alpha}_f, \hat{\rho}_f, \mathbf{Cp}_f, \mathbf{Cc}_f, \mathbf{q}_f), \quad (3.31)$$

onde  $\hat{\alpha}_f$  e  $\hat{\rho}_f$  consistem na representação de  $l_f$  em coordenadas polares, calculadas como abordado na seção 3.3.2.  $\mathbf{Cp}_f$  é a matriz de covariância proveniente do processo de propagação proposto por [Haralick 1994], e  $\mathbf{Cc}_f$  é a matriz de covariâncias calculada para o domínio espaço *versus* tempo.  $\mathbf{q}_f$  é um vetor que contém todos os pontos  $(x_{fj}, t_{fj})^T$ , na curva de tempo de trânsito, pertencentes ao  $f$ -ésimo grupo de fase.

O algoritmo para extração, classificação e propagação das incertezas, pode ser resumido da seguinte forma:

1. Início do processo: Dados de entrada, tempo de trânsito  $\mathcal{Z} = (x_j, t_j)$  e fator de dispersão para extração dos segmentos de reta  $\sigma_{max}$ ;
2. Fase de extração dos segmentos:
  - Executa SMF (Seção 3.3);
  - Gera lista de segmentos  $\mathbf{l}_k = (\rho_k, \alpha_k, \mathbf{C}_k, \bar{x}_k, \bar{t}_k, \mathbf{q}_k, \mathbf{u}_k)$ ;
3. Executa Classificação dos segmentos:
  - Busca em todos os segmentos extraídos  $\mathbf{l}_k$  por meio de sua inclinação, determinada pelas equações (3.21) e (3.22);
  - Cada segmento é classificado em:  $P_g$  e  $P_n$ ;
  - Os segmentos de mesma classe são agrupados como se fossem uma única reta com os parâmetros:  $\mathbf{l}_f = (\hat{\alpha}_f, \hat{\rho}_f, \mathbf{Cp}_f, \mathbf{Cc}_f, \mathbf{q}_f)$ .
4. Propagação das incertezas
  - Para cada segmento  $\mathbf{l}_g$ , estima-se a matriz de covariâncias por dois métodos: (1) Propagação de matriz de covariância e Transformada Unscented;
5. Saída: Curva de tempo de trânsito das primeiras quebras com o grupos de fase identificados.
6. Fim do Processo.

### 3.6 Considerações finais

Este capítulo apresentou metodologia de extração e classificação de segmentos de reta, a partir do tempo de trânsito das primeiras quebras de levantamentos de refração sísmica profunda. Utilizou-se o algoritmo SMF para extração dos segmentos e a técnica de rastreamento da inclinação de reta para calcular os parâmetros de classificação dos segmentos nos grupos de fase Pg (onda direta) e Pn (onda refratada na Moho).

Aspectos sobre o algoritmo de agrupamento difuso devem ser considerados. Apesar de seu objetivo em minimizar uma função de custo  $J$ , pouco é sabido sobre seu comportamento durante convergência [Theodoridis e Koutroumbas 2003]. Sabe-se que, a partir do critério de minimização da distância de Mahalanobis, aliado ao teorema da convergência global de Zangwill [Luenberger 1984], a seqüência de iteração do algoritmo de agrupamento difuso por protótipo converge para um ponto estacionário da função de custo (em um número finito de passos). Esse ponto pode ser um mínimo local ótimo (ou global) ou um ponto de sela na função de custo. Mais informações sobre convergência numérica e discussões sobre sua natureza podem ser encontrados em [Bezdeck J.C. & Hathaway 1992], [Ismail M.A. & Selim 1986].

Apesar de conter um grupo de fase referente à propagação de ondas compressoriais na crosta, informações sobre seu comportamento ao longo da crosta inferior não estão disponíveis no tempo de trânsito das primeiras quebras. Esse fato infere em uma limitação nos métodos de modelagem direta em estruturas mais profundas, com a crustal. A falta de informações sobre a crosta inferior acarreta um valor que não corresponde às reais características da crosta, como velocidade de propagação e profundidade [Giese 1976].

Para contornar essa limitação, a próxima etapa busca encontrar uma base de dados, dentro do sismograma composto, a qual contenha informações sobre a totalidade da crosta. Grupos de fase relacionados à reflexão de alto ângulo na Moho (PmP), possuem esse tipo de informação [Stein e Wyssession 2003]. Apesar de não apresentar-se como primeira quebra no sismograma, peculiaridades como porção de energia refletida, e amplitude no instante de chegada das fases, são levados em consideração para detecção e interpretação das informações.

## Capítulo 4

# Detecção da chegada do grupo de fase PmP e construção de um modelo crustal inicial unidimensional

### 4.1 Introdução

O capítulo anterior abordou o problema da classificação dos pontos da curva do tempo de trânsito em dois tipos de grupo de fases: ondas diretas que trafegam pela crosta superior (Pg), e refratadas na Moho (Pn). A metodologia abordada utilizou dois algoritmos: extração e classificação dos segmentos de reta.

De acordo com [Stein e Wysession 2003] e [Giese 1976], manipulações algébricas nos segmentos provenientes das primeiras quebras, permitem obter características acerca da estruturação crustal em uma determinada área da região de estudo. Os grupos de fase que trafegam pela crosta fornecem informações sobre sua velocidade de propagação. O grupo de fase Pn, permite obter a velocidade de propagação no manto superior. Já a associação dos dois tipos de grupos de fase resultam na determinação espacial (em termos de profundidade) da descontinuidade de Moho.

Entretanto, conforme abordado na seção 1.4, o levantamento dos dados das primeiras quebras não fornecem informações sobre o comportamento da parte inferior da crosta. De maneira oposta, sua chegada é “mascarada” pelas fases Pn, que trafegam pelo manto superior com tempo de trânsito menor, proporcionado pela velocidade de propagação mais alta do que a crosta inferior. Essa característica torna-se um fator limitante na modelagem direta das primeiras quebras, para determinação de uma estrutura crustal.

A falta de informação sobre a parte inferior da crosta afeta a determinação dos valores reais sobre sua velocidade de propagação e profundidade. Se considerarmos que a velocidade de propagação aumenta com a profundidade, o não mapeamento da crosta inferior, a determinação da velocidade média de propagação seria menor do que a real velocidade média na crosta. De acordo com [Giese 1976], a dispersão dos parâmetros determinados, em relação ao seu valor real, encontra-se totalmente polarizado, em um limite extremo de precisão. O erro de determinação aumenta

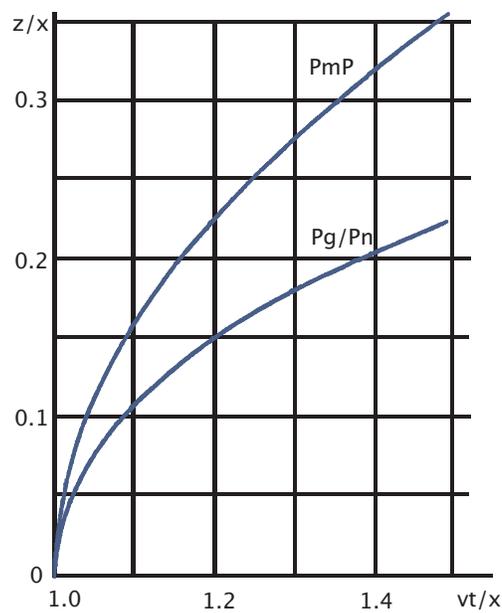


Figura 4.1: Diagrama ( $z/x \times vt/x$ ) que mostra a discrepância entre a determinação da profundidade da crosta. Note que para pequenas distâncias  $x$ , as fases Pg/Pn fornecem informações próximas às dos valores reais. Para maiores profundidades, no entanto, o erro é considerável. Fonte: [Giese 1976].

proporcionalmente à medida em que a profundidade, velocidade e tempo de chegada aumentam, e é inversamente proporcional ao tamanho da espaço na superfície utilizado para o levantamento do estudo. A Figura 4.1 mostra o diagrama que relaciona todas as grandezas descritas na forma de duas curvas, parâmetros reais (PmP) e provenientes das primeiras quebras (Pg/Pn).

A grandeza relacionada ao espaço determina que, quanto menor for o tamanho da linha sísmica ( $x$ ), maior será a imprecisão na determinação dos parâmetros pelos dados de primeira quebra. De maneira oposta, se o objetivo é levantar áreas com maiores velocidades ( $v$ ) e profundidades ( $z$ ), acarretaria na obtenção de um maior tempo de trânsito ( $t$ ), e maior será o erro de determinação se primeiras quebras forem utilizadas [Giese 1976]. Valendo-se da representação gráfica do tempo de trânsito, os traços referentes aos grupos de fase Pg/Pn podem ser denominados como frentes progressivas (*progressive branches*). A Figura 4.2 justifica graficamente a adoção dessa terminologia.

De maneira análoga à determinação das Pg/Pn, as frentes de onda refletidas na interface de duas camadas é encarada como **frente regressiva** (*regressive branches*). No caso da refração sísmica, o grupo de fase que representa a reflexão na Moho é representado pela sigla PmP. Esse grupo de fase caracteriza-se por percorrer somente a região da crosta, sem qualquer tipo de alteração ou interferência exercida pelo manto superior. A determinação da velocidade de propagação e profundidade da crosta é possível de ser determinada através de manipulação da equação que descreve o comportamento da PmP [Stein e Wysession 2003]. Apesar de não apresentar-se como primeira quebra, características como forma ligeiramente hiperbólica e alto coeficiente de refletividade no instante de chegada nas proximidades do ponto crítico, tornam a fase PmP possível de ser detectada.

Nesse sentido, o objetivo preliminar desse capítulo é detectar as fases referentes ao grupo da

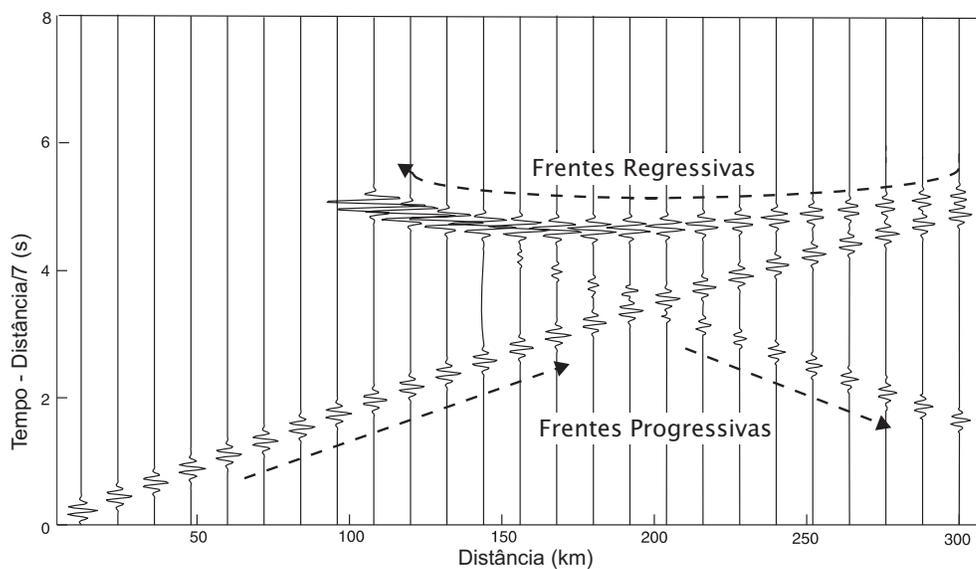


Figura 4.2: Traços das fases diretas e refratadas, representadas como frentes progressivas, e fase refletida, representada como frente regressivas [Giese 1976].

PmP, e determinar os valores da velocidade e profundidade da crosta, após a detecção, por meio de estimação estatística. O grupo de fase Pn, é utilizado para estimar a velocidade de propagação no manto superior e para determinar pontos de busca iniciais para forma o grupo de fase PmP.

## 4.2 Revisão sobre as principais técnicas de detecção de fases tardias e construção de modelos

É indubitável a relevância em determinar um modelo de velocidades, mesmo que inicial, para futura análises dos dados. Esse modelo pode servir como parâmetro de entrada para algoritmos iterativos, limitando seu espaço de soluções possíveis, e diminuindo o tempo computacional gasto na busca de um resultado. Técnicas que utilizam a inversão dos dados para determinação de um modelo crustal, mostram-se eficientes, dependendo das informações *a priori* disponibilizadas [Zelt 1999].

Já a abordagem do problema na construção de um modelo de forma automatizada, possui entraves no grau de dificuldade em encontrar uma solução coerente. Detecção de fases e determinação de uma solução única são fatores proibitivos para construção do modelo. Algoritmos para detecção de fases com mesma propriedade de propagação, como por exemplo nas fases de ondas compressivas, não são profundamente explorados, se comparados com as técnicas de detecção de primeiras quebras e de detecção de fases tardias, mas de natureza distinta (compressional e cisalhantes).

Essa revisão busca mostrar os principais algoritmos utilizados para detecção de fases tardias e as principais técnicas de construção de modelos de velocidade. As técnicas de detecção, apesar de voltadas para sismologia, podem ser utilizadas na refração por atuarem no traço sísmico. A pesquisa das técnicas de construção de modelo avalia as principais metodologias utilizadas na

## 4.2.1 Técnicas de detecção de fases tardias

### 4.2.1.1 Estatística de Alta Ordem aliada à Transformada Wavelet

Em [Saragiotis, Hadjileontiadis e Panas 1999] e [Saragiotis, Hadjileontiadis e Panas 2000], os autores buscaram aliar as técnicas de Estatística de Alta Ordem, para detecção das primeiras quebras (P), e Transformada Wavelet, para apontar o instante de chegada das fases secundárias (S). A justificativa para tal encontra-se na dificuldade em determinar as fases S, dado alto grau de interferência pela coda da primeira quebra. Os autores verificaram que a Transformada Wavelet é capaz de discriminar características entre as ondas P, S e o ruído de fundo, através da representação do registro em diversas escalas. Todas as técnicas devem ser aplicadas em traços compostos por três componentes de registro, pois a rotação de eixos é necessária para que a técnica seja realizada.

A técnica em [Saragiotis, Hadjileontiadis e Panas 1999], utiliza os autovalores e autovetores da matriz de covariância da janela ao redor da onda P previamente identificada. Os três autovalores calculados representam a extensão dos eixos do elipsóide de polarização das três componentes do sismômetro. Calcula-se o ângulo entre o maior eixo da elipsóide e o eixo vertical para rotacionar os sinais pertencentes ao eixo horizontal, melhorando as características das ondas S. Após a rotação dos eixos, aplica-se a técnica de detecção por Estatística de Alta Ordem no traço sísmico modificado para conter as seguintes informações: 1) a onda P extraída do sinal original, 2) mesma onda em uma escala da transformada wavelet, e 3) os traços horizontais rotacionados em uma diversas escalas wavelets (normalmente as mais altas). O maior valor absoluto da soma cumulativa cruzada é considerado como a identificação da onda S.

Diferentemente de [Saragiotis, Hadjileontiadis e Panas 1999], outra técnica utilizada busca o realce das ondas S por meio da aplicação do filtro baseado de Transformadas Wavelets Discreta (DWT), para evidenciar as características das ondas S, sob influência das ondas primárias. [Saragiotis, Hadjileontiadis e Panas 2000].

O filtro DWT, de acordo com [Saragiotis, Hadjileontiadis e Panas 2000], é utilizado separar as partes estacionárias e não-estacionárias do registro sísmico. Essa separação é feita pela decomposição e reconstrução do sinal combinado com limiar de separação. O filtro DWT é aplicado em um segmento da região pré-definida, afim de retirar a coda P da região de provável chegada da onda S. Baseando-se no traço filtrado, os autores aplicam as técnicas *skewness* e *kurtosis* para detectar a onda S.

A principal desvantagem desses dois métodos está na necessidade de utilizar traços compostos por três componentes. A maioria dos estudos de refração sísmica utilizam registros de uma componente, o que tornaria inviável a aplicação do método.

#### 4.2.1.2 Detecção pela construção de um diagrama de coeficientes Autoregressivos

Algoritmos que utilizam da técnica de representação do traço sísmico por meio de coeficientes autoregressivos, são conhecidos pela capacidade de extrair informações que realçam a chegada de diferentes fases. Baseados em uma prévia estimação do sinal de interesse, esses algoritmos fornecem modelos de comportamento para diversos tipos de fases, mesmo as que possuem mesma propriedade de propagação.

Os autores em [Leonard e Kenett 1999] constataram que a representação de uma série temporal, constituída pelos coeficientes do modelo autoregressivo de baixa ordem, pode ser utilizada para descrever a chegada de diversas fases no sismograma. Baseado na premissa de que processos mais complexos são representados por modelos de ordem maior, os autores propuseram a construção de um diagrama de coeficientes, denominado *AR-grama*.

De acordo com o comportamento dos coeficientes do modelo AR, os autores conseguiram estabelecer uma paradigma que relaciona e classifica as chegadas das fases. A partir do estabelecimento do melhor modelo pelo AIC [Akaike 1973], realiza-se a construção do diagrama temporal de coeficientes.

A principal vantagem desse método encontra-se na capacidade de detecção de diversas fases, mesmo àquelas que possuem características de propagação semelhantes, como o caso da refração sísmica. Entretanto, o algoritmo só é capaz de identificar o tipo de fase se for auxiliado por uma tabela de informações *a priori* que associe a distância do evento com a provável chegada da fase.

#### 4.2.1.3 Detecção por redes neurais

O trabalho em [Dai e MacBeth 1995] concebeu um algoritmo para determinar automaticamente a chegada das fases P e S, a partir da análise das três componentes ortogonais do sistema de registro de dados sísmicos. Definiu-se a estrutura para rede baseado na frequência de amostragem do sistema de aquisição, com uma camada de entrada composta por trinta nós, e dois nós na camada de saída, onde o valor (1,0) corresponde a uma fase e (0,1) corresponde ao ruído. A definição no número de nós da camada oculta depende de fatores como: número de nós da camada de entrada e de saída, e volume de dados utilizados para aprendizagem. A topologia da rede é de alimentação positiva, e seu aprendizado supervisionado, com algoritmo de treinamento *backpropagation*.

A detecção das fases dá-se através da aplicação de uma janela móvel no sismograma, isolando o segmento que contém a chegada. Cada segmento é devidamente normalizado para evitar que a rede tenha na sua entrada sinais com diferentes amplitudes. Um valor de segmento é constituído a partir das três componentes de movimento. O vetor instantâneo de movimento é calculado para cada uma das componentes, e são apresentados à entrada da rede. Se o contraste entre o sinal sísmico e o ruído sísmico de fundo é elevado, o tempo de chegada é caracterizado pela mudança em amplitude do traço. Caso contrário, o principal fator discriminante concentra-se nas suas características espectrais.

Da mesma forma do algoritmo anterior, busca-se determinar características distintas entre as ondas P e S. Contudo, o algoritmo necessita de traços compostos por três componentes para realizar

## 4.2.2 Construção de modelos de velocidade

A construção de modelos de velocidade a partir dos pontos adquiridos e dos grupos de fase identificados, consiste no ponto crucial na interpretação e transformação das informações de espaço *versus* tempo, em termos de profundidade *versus* velocidade de propagação. Desde os primórdios das técnicas de refração sísmica profunda, diversos paradigmas de modelagem foram desenvolvidos, afim de agilizar o trabalho de determinação, e estabelecer um paradigma capaz de fornecer informações consistentes dos parâmetros físicos.

Os tipos de modelagens existentes podem ser classificadas em direto e inverso. Independentemente do método para construção do modelo, considerações como qualidade dos dados e conhecimento prévio da área de estudo, traduzem-se em uma maior certeza fornecer um modelo mais realista, condizente com o ambiente geotectônico. Para construção final do modelo, entretanto, a escolha entre direta e inversa deve ser feita, ainda que ambos possam utilizados em conjunto.

Uma das grandes limitações para determinação de um modelo de estrutura crustal, seja direto ou inverso, encontra-se na não unicidade de sua solução. Isso significa que diversos modelos podem ser utilizados para um mesmo espaço de dados. O uso de informações auxiliares *a priori* ajudam a reduzir o espaço de soluções do modelo.

Além das informações auxiliares, técnicas aplicadas após a construção dos modelos auxiliam na determinação dos parâmetros mais próximos das características reais. O paradigma proposto por [Mozorov 2004], determina a significância estatística em diversos modelos, de forma a avaliar qual melhor descreve a base de dados utilizada. A partir de dados compostos por tempos de primeira quebra, faz-se a inversão dos dados por amostragem de Monte Carlo para avaliar a estatística para cada modelo utilizado.

O método proposto por [Malverino 2000] estabelece um critério de seleção Bayesiano de forma a ordenar diversos modelos a partir de sua probabilidade *a posteriori*, dado diferentes modelos geofísicos. A probabilidade, calculada pela regra de Bayes, é maior para os modelos que melhor descrevem os espaço de dados, os quais simplesmente possuem menos parâmetros livres.

### 4.2.2.1 Modelos diretos

O modelo direto consiste em determinar os parâmetros de construção do modelo crustal a partir da observação da forma e do tempo de chegada dos grupos de fase. Realizam-se alguns cálculos para determinar parâmetros iniciais e, uma vez determinado o modelo *a priori*, um novo modelo é ajustado de forma a adequar-se aos dados de entrada. Todo o processo é feito de forma manual, e demanda tempo considerável até chegar a um modelo que melhor descreva os dados.

Não é simples descrever as principais vantagens em utilizar o método direto, mas elas se relacionam, principalmente, com o pensamento de obtenção de resultados geologicamente mais significativos. Isso se dá ao longo do processo de construção do modelo, onde o especialista tem um maior “controle” subjetivo de todo o processo e é permitido inferir e extrapolar sobre interfaces e

camadas que compõem a estrutura como um todo.

Programas utilizados para construção de modelos unidimensionais, o usuário insere os parâmetros e os dados utilizados na forma de uma tabela. A partir de então, ajustam-se os parâmetros até atingir um modelo que melhor descreva os dados. Para modelos bidimensionais, o algoritmo de traçado de raio é o mais popular para construção de modelos em refração sísmica profunda. Estes programas permitem construir modelos e, a partir do método de traçado de raio proposto por [Molotkov 1977], gerar curvas de tempo de trânsito sintéticas para comparação com o tempo de trânsito adquirido. Levam-se em consideração características como várias camadas ou variações laterais de velocidade.

#### 4.2.2.2 Modelos construídos por inversão iterativa de modelos *a priori*

A construção do modelo por inversão de modelos é aplicado em casos de levantamento bidimensionais, e inicia-se a partir de modelos unidimensionais ao longo da linha sísmica. A solução do problema de inversão, de acordo com a parametrização do modelo, atendem os seguintes métodos: (1a) uniforme com grade detalhada de parametrização ou (1b) não uniforme com fraca grade de parametrização, e (2a) modelo mínimo de estrutura ou (2b) modelo não mínimo de estrutura. As abordagens em (1) são utilizadas em conjunto com (2) para obter o modelo final.

O método com grade detalhada de parametrização para um modelo mínimo de estrutura é equivalente ao modelo estabelecido por parâmetro mínimo. Essa aproximação utiliza uma grade de parâmetros, e busca pela configuração que melhor represente as informações de entrada. O modelo de entrada tenta ser o mais simples possível e busca-se construir uma grade mais fina possível de modo a representar a realidade do modelo esperado.

A abordagem por parâmetro-mínimo/modelo de estrutura principal atua em sentido contrário ao método abordado anteriormente. O modelo mínimo pode conter alguns aspectos das informações mais relevantes, ou então descrever de forma detalhada a área de estudo. A partir do modelo mínimo, o algoritmo de inversão busca, de forma iterativa, a organização dos parâmetros que minimizam o modelo de perturbação de modo a obter o modelo com as principais informações.

A inversão pode abordar a criação de uma grade detalhada de parâmetros de modo a encontrar um modelo principal de estrutura. O modo de atuação dessa abordagem assemelha-se com o primeiro método. A diferença está na definição dos parâmetros principais, que nesse caso pode ser de cunho geológico. Além dos parâmetros principais, pequenas mudanças no modelo inicial são adotadas para inversão.

Todos esses métodos para realização da inversão são abordados em [Zelt 1999] para modelos duas dimensões, utilizando dados de entrada e de informações relevantes para o algoritmo. Note que as diversas abordagens permitem que qualquer tipo de informação, relevante à construção do modelo estrutural, pode ser utilizada para realização da inversão.

## 4.3 Detecção do grupo de fase PmP

### 4.3.1 Características do tempo de trânsito das fases PmP

O grupo de fase PmP é formado pela reflexão das ondas P na Moho. Seu tempo de percurso da fonte aos receptores é maior do que os grupos Pg e Pn, o que o classifica como chegada tardia. Na maioria dos casos, o surgimento da PmP é prejudicado por conta da interferência causada pela coda dos outros grupos de fase. A Figura 4.3 identifica a PmP em um sismograma composto sintético.

A “contaminação” no provável tempo de chegada da PmP inviabiliza a determinação precisa de sua ocorrência. Entretanto, amplitudes do grupo de ondas que formam a PmP, possuem características que permitem desenvolver metodologias para sua detecção. A correlação entre os traços adjacentes, e o alto coeficiente na energia de reflexão no ponto crítico e proximidades, são os principais fatores que realçam a chegada da PmP.

Na refração sísmica profunda, em especial quando aplicado ao estudo da estrutura crustal, a extensão da linha é considerado um problema para o registro dos eventos controlados, principalmente em sensores localizados nos pontos mais distantes da fonte. O princípio de correlação entre o grupo de ondas é uma ferramenta extremamente útil na detecção e classificação do grupo de fase. A correlação lateral de traços significa ajustar espacialmente a chegada dos grupos de onda semelhantes, localizados em traços sísmicos. A correlação pode ser realizada para identificar um segmento de reta ou curvilíneo. No caso específico da PmP, a forma de correlação entre os traços busca encontrar uma forma hiperbólica.

Quando uma frente de onda sísmica atinge uma interface, parte de sua energia é refratada ou transmitida para camadas inferiores, e o restante é refletida para superfície. A relação entre qual

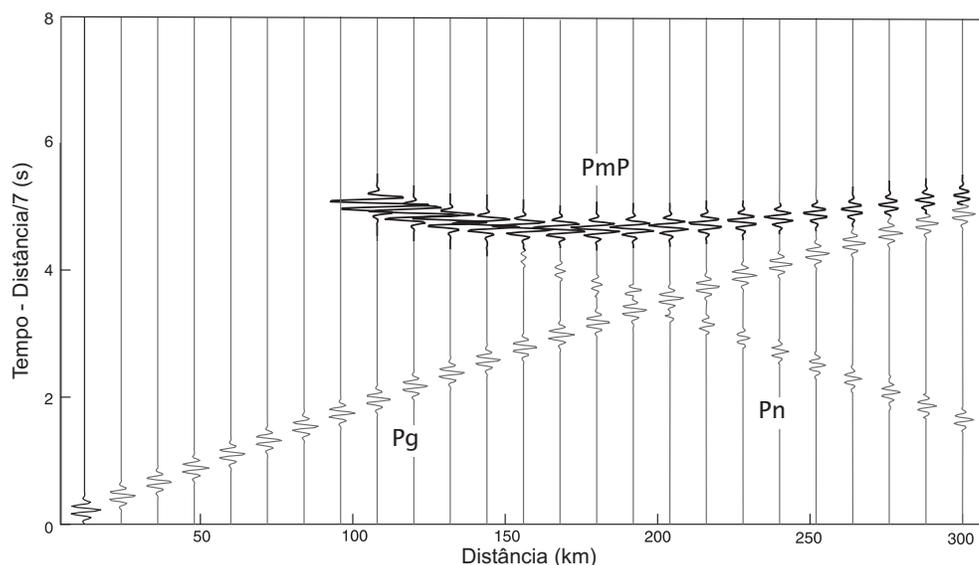


Figura 4.3: Sismograma composto sintético destacando a chegada do grupo de fase PmP (em preto). O ponto de maior amplitude da PmP é o ponto de reflexão crítica e representa o ponto de início da refração na Moho.

porção da energia é refletida depende de parâmetros físicos do meio de propagação, como relação de velocidade, densidade e elasticidade de cada meio pelo qual passou a frente de onda. A Figura 4.4 apresenta um gráfico relacionando o percentual da energia refletida para superfície de uma frente de onda que incidiu em uma determinada interface. Note que, para uma razão de velocidade de  $\alpha_1/\alpha_2 = 1,5$  e Razão de Poisson  $\sigma_1 = \sigma_2 = 0,25$ , o ângulo de incidência na interface que permite o retorno máximo da energia, está em torno de  $40^\circ$ .

Características auxiliares são observadas quando se trata a observação de fases refletidas. O ponto de retorno máximo de energia ocorre quando o ângulo de incidência é crítico. Esse ponto  $(x_c, t_c)^T$ , chamado de crítico, pode ser definido como o ponto onde o tempo de chegada da reflexão (PmP) é idêntico ao ponto de chegada da refração (Pn). O ponto crítico caracteriza-se por possuir máxima amplitude, proporcionado pelo alto coeficiente de refletividade [Giese 1976]. Para espessuras crustais entre 30 e 50 km, o ponto crítico aparece entre 60 e 90 km de distância da fonte controlada. A informação da máxima amplitude serve como um parâmetro auxiliar para caracterizar as variações na espessura da crosta. As dificuldades na determinação do ponto crítico são causadas pelo espalhamento do grupo de ondas na região de máxima amplitude, o que impede a determinação precisa do seu tempo de chegada.

### 4.3.2 Informações auxiliares na detecção das fases

Como definido anteriormente, o ponto crítico é considerado dentro da curva de tempo de trânsito como o ponto que coincide o tempo de chegada entre o grupos Pn e PmP. No ponto crítico, e em traços adjacentes, a energia refletida pela frente onda que incide na interface é máxima [Giese 1976].

O ponto crítico localiza-se como uma fase tardia dentro do traço sísmico, contaminada pela coda das fases que antecedem sua chegada. Essa característica é limitante para adoção de qualquer método de detecção que inicie a busca do início do traço sísmico, dado à presença de outras fases

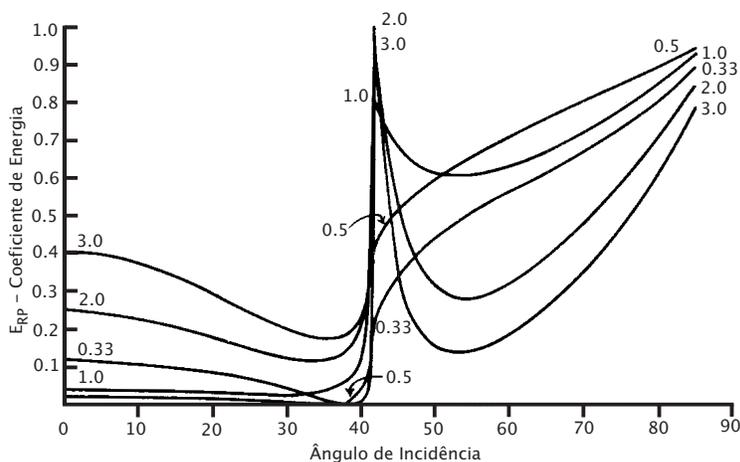


Figura 4.4: Percentual de energia refletida de uma frente de onda para diversas razões de densidade.  $\alpha_1/\alpha_2 = 1,5$  e  $\sigma_1 = \sigma_2 = 0,25$ . Fonte: [Geldar 1995]

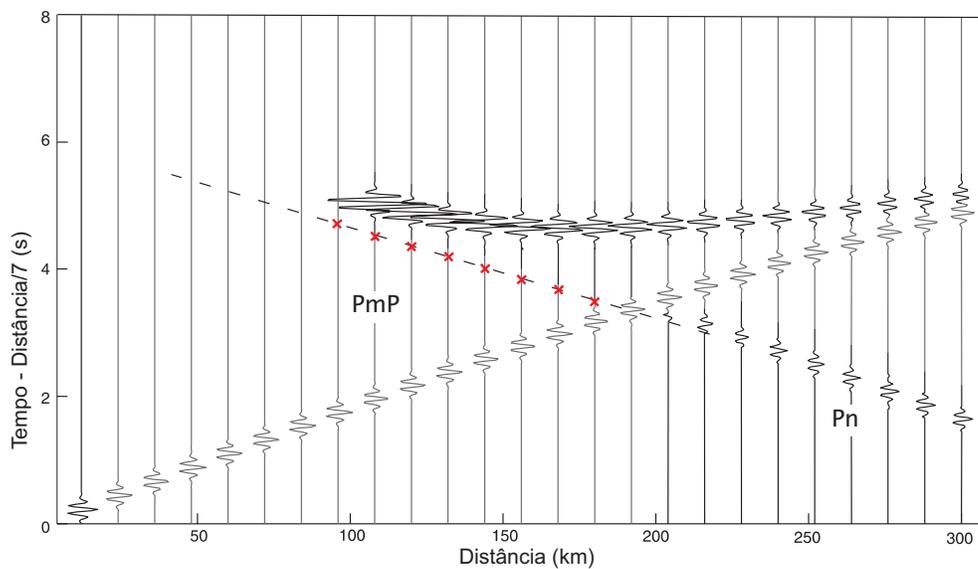


Figura 4.5: Utilização do segmento do grupo de fase Pn como ponto inicial na identificação do tempo de chegada da PmP. A extrapolação do segmento é representada pelos pontos vermelhos.

com maior energia do que a PmP, além do gasto computacional dado o considerável volume de dados. Diante de tal fato, é necessária a adoção de medidas auxiliares, de modo a possibilitar execução de algoritmos de detecção dentro de um intervalo mais confiável.

A medida adotada para contornar essa limitação parte da definição do ponto crítico, onde determinam-se os pontos iniciais para detecção com base no grupo de fases Pn, já definido no capítulo 3. A porção visível da Pn, localizada na região de primeira quebra é utilizada para tal fim. A partir dos parâmetros do segmento de reta estimados, extrapola-se o segmento para o provável tempo de chegada na distância em que seria a ocorrência do ponto crítico de incidência na Moho, entre 60 e 90 km. Esse tempo de partida da detecção, é definido como a amostra inicial para a busca da fase PmP no traço sísmico.

Com essa medida, pretende-se reduzir o espaço de soluções na detecção da PmP, dado que a busca da fase é realizada dentro de uma janela de tamanho controlado, onde o principal objetivo é observar e apontar as principais características da PmP na região de ponto crítico. Esse tipo de busca acarreta uma redução considerável no tempo computacional do processo. A Figura 4.5 mostra um exemplo onde o segmento da Pn é extrapolado até a região de ponto crítico.

### 4.3.3 Técnicas utilizadas na detecção

As técnicas de detecção buscam extrair principais características da PmP dentro do sismograma composto. Busca-se melhorar a qualidade dos resultados da detecção a partir das principais informações sobre a formação e energia da PmP. Os dados auxiliares abordados, tem o objetivo de reduzir o tempo gasto na realização de todo o processo.

Quatro técnicas foram adotadas: observação da 1) amplitude máxima, 2) janela de energia máxima, estatística de alta ordem de 3) terceira ordem (*skewness*) e de 4) quarta ordem (*kurtosis*). Todos os métodos buscam, dentro de uma janela definida, para que não haja o risco de detecção de

outras fases senão a PmP. O ponto inicial de busca é definido a partir da extrapolação do segmento da fase Pn. Cada método de detecção é aplicado de acordo com a qualidade dos traços adquiridos, e deve ser escolhido pelo usuário.

#### 4.3.3.1 Máxima amplitude do grupo de onda

Considerada a maneira mais simples para detecção da chegada de fases, a avaliação do valor absoluto máximo da amplitude, é utilizado para validação do processo de identificação e utilização da PmP, na construção de modelos de velocidade. Aplicado em traços sintéticos, sua grande vantagem está na simplicidade de implementação.

A busca da PmP é feita por meio da leitura de todas as amostras, dentro da janela do traço sísmico. A amostra que apresentar o maior valor absoluto, é considerada como a possível chegada do grupo de onda da PmP. A Figura 4.6 mostra um exemplo aplicado a partir dos dados sintéticos.

Apesar da simplicidade de implementação, este método não é útil para a maioria dos traços reais, onde a dispersão causada pelo meio, nem sempre permite que a PmP possua grande excursão de amplitude de fácil identificação.

#### 4.3.3.2 Máxima energia

Este método consiste na avaliação da energia do traço sísmico para verificar, além das variações de amplitude, perturbações que ocorrem na chegada da PmP. Além de traços sintéticos, a avaliação da máxima energia serve para traços com boa relação sinal/ruído, ou em casos em que a componente espectral do grupo de ondas da PmP concentra-se na região de baixa frequência.

A avaliação de energia é feita a partir da construção de uma janela deslizante de uma amostra, dentro do intervalo de busca da PmP. A janela que apresentar maior valor é considerada como a que possui maior energia. O tempo de referência da janela é apontado como a provável chegada

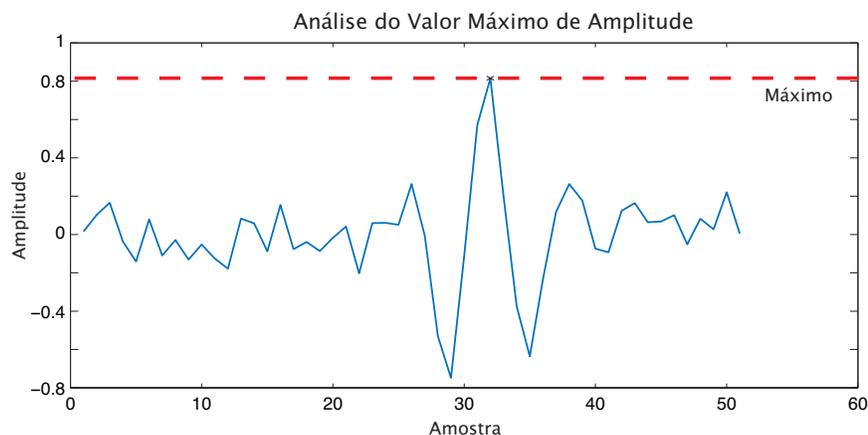


Figura 4.6: Método de busca pelo valor máximo da amplitude no intervalo do traço. A linha pontilhada em vermelho aponta qual o valor máximo encontrado no segmento e o determina como ponto de chegada da PmP.

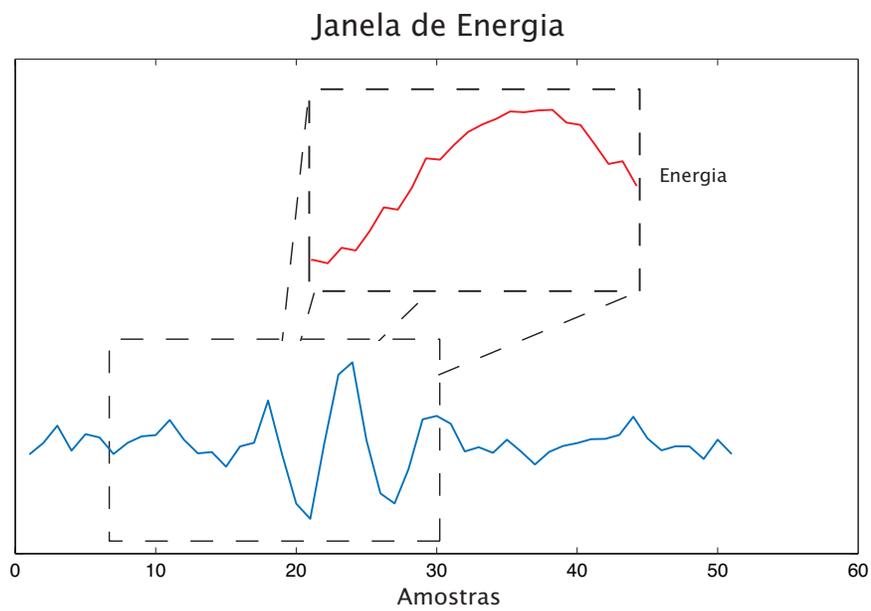


Figura 4.7: Método de busca pela janela com maior energia. O vetor de energia é obtido da equação 4.1. A chegada da fase PmP estará no valor máximo do vetor  $E(i)$

da PmP. O cálculo da energia é expresso a partir da seguinte equação:

$$E(i) = \sum_{j=1}^{N_j} t_j^2, \quad (4.1)$$

onde  $i$  é a amostra base para o cálculo da energia,  $N_j$  é o tamanho da janela de análise, e  $t_j$  a amostra do traço sísmico.

A Figura 4.7 apresenta um exemplo, a partir de traços sintéticos, onde a diferença de energia é mostrada, antes, durante e depois da ocorrência da PmP.

A principal vantagem da avaliação da energia sobre a amplitude encontra-se na delimitação espectral do traço causada pela utilização da janela deslizante. Considerando que o grupo de onda da PmP não ocupa todo o espectro de frequências, esse artifício permite aumentar a resposta no traço, caso o tamanho da janela seja escolhido adequadamente. O método não é eficiente caso a relação sinal/ruído do traço seja muito baixa.

### 4.3.3.3 Aplicação da Estatística de Alta Ordem

A utilização desse método parte do princípio de que a crosta não é homogênea em um ambiente tectônico real. Frentes de onda que propagam-se em regiões com diversas variações de velocidade, acarretam em interações de diversas fases e codas de fases, provenientes de refrações e reflexões em várias interfaces. Esse influência também é exercida na região de ponto crítico. A soma de todas as “interferências”, se levarmos em consideração a complexidade da composição da crosta, assume um comportamento aleatório que pode comportar-se como uma função de densidade de probabilidade Normal.

Partindo do princípio de alta refletividade na região do ângulo crítico e das considerações aleatórias descritas anteriormente, utilizam-se técnicas de medição de terceira e quarta momento cumulante para detecção. Os momentos de terceira e quarta ordem  $R_3^X(m, n)$  e  $R_4^X(m, n, l)$ , a partir de um processo aleatório real e estacionário até o quarto momento  $X\{k\}$ , são definidos como [Saragiotis, Hadjileontiadis e Panas 2000]

$$R_3^X(m, n) \equiv E\{X(k)X(k+m)X(k+n)\} \quad (4.2)$$

$$R_4^X(m, n, l) \equiv E\{X(k)X(k+m)X(k+n)X(k+l)\}, \quad (4.3)$$

onde  $m, n$  e  $l$  representam os atrasos considerados na seqüência.

As seqüências cumulantes de terceira e quarta ordem  $C_3^X(m, n)$  e  $C_4^X(m, n, l)$  de um processo aleatório são definidas como

$$C_3^X(m, n) = R_3^X(m, n) \quad (4.4)$$

$$C_4^X(m, n, l) = R_4^X(m, n, l) - 3(R_2^X(m))^2. \quad (4.5)$$

Observações do cumulante de terceira e quarta ordem para um atraso nulo  $m = n = l = 0$ , são medidas de dispersão aplicadas na estatística descritiva para descrever a simetria e curtose de uma distribuição. Considerando seqüência  $X(k)$  de observações reais de um traço sísmico, as estimativas de simetria (*skewness*) e curtose (*kurtosis*) são obtidas a partir das relações [Saragiotis, Hadjileontiadis e Panas 2004]

$$\hat{\gamma}_3 = \frac{\sum_{k=1}^M (X(k) - \hat{m}_X)^3}{(M-1)\hat{\sigma}_X^3} \quad (4.6)$$

$$\hat{\gamma}_4 = \frac{\sum_{k=1}^M (X(k) - \hat{m}_X)^4}{(M-1)\hat{\sigma}_X^4} - 3, \quad (4.7)$$

onde  $\hat{m}_X$  e  $\hat{\sigma}_X$  são as estimativas da média e variância da seqüência  $X(k)$ . Para distribuições Gaussianas, os valores de *skewness* e *kurtosis* são nulos.

Em termos práticos, a estimativa *skewness* analisa a simetria na distribuição de uma seqüência de acordo com as relações entre as medidas de moda, média e mediana. Quando o valor de *skewness* é nulo, a distribuição é dita simétrica e apresenta o mesmo valor para as três medidas de primeiro momento citadas. A *kurtosis* é uma medida de dispersão utilizada para avaliar o grau de “achatamento” da distribuição, ou o quanto a curva é achatada em relação à curva de distribuição normal. O valor da estimativa será nulo quando apresentar o mesmo grau de achatamento de uma

distribuição normal (*mesocúrticas*). Se  $\hat{\gamma}_4 > 0$ , a curva é mais alta e concentrada que a distribuição normal (*leptocúrtica*), e será mais achatada (*platicúrtica*) se  $\hat{\gamma}_4 < 0$ .

Supondo que a distribuição Gaussiana possua valores nulos para os cumulantes zero de terceira e quarta ordem, a interferência causada pelas várias chegadas na região do ponto crítico, se supormos um comportamento Gaussiano, apresentará baixos valores para as mesmas estimativas. No entanto, o instante de chegada da PmP significa uma perturbação no traço de análise, ocasionando o aumento de valor nos dois cumulantes.

A análise do traço é feita por meio de uma janela deslizante de uma amostra, que calcula as estimativas  $\hat{\gamma}_3$  e  $\hat{\gamma}_4$  de acordo com as equações (4.6) e (4.7). Utiliza-se somente um passo na janela deslizante com o objetivo de apontar a região mais provável de ocorrência da fase. Considera-se o instante de chegada da PmP, como àquele que obtiver o maior valor da estimativa dentro do intervalo do traço. As vantagens na utilização da estatística de alta ordem estão na sua facilidade de implementação e na característica de observação de informações relevantes sobre a PmP na presença de ruído. A maior dificuldade de implementação encontra-se na determinação do tamanho apropriado da janela deslizante. Janelas com muitas amostras acarretam em imprecisão da determinação do instante de chegada. Em contrapartida, a utilização de poucas amostras pode não conter significância estatística para *skewness* e *kurtosis*. Deve-se escolher o tamanho adequado através da análise do registro utilizado. A Figura 4.8 mostra o exemplo do comportamento das estimativas em um traço sintético acrescido por uma seqüência branca. Note que o maior valor de ambas as estimativas está na região de chegada da PmP.

Ao término do algoritmo de detecção, os pontos  $(x_j, t_j)$  da PmP são agrupados em um vetor  $\mathbf{I}_{PmP} = \{(x_j, t_j) | j = 1, \dots, J\}$ , onde  $J$  é o número de traços utilizados. Esse vetor servirá como dado de entrada na construção do modelo de velocidade da crosta.

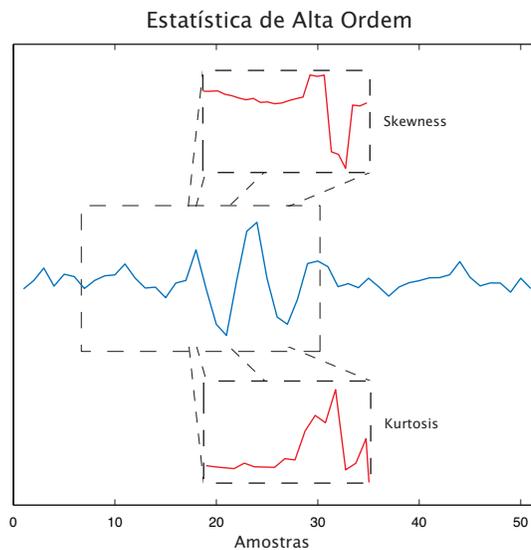


Figura 4.8: Detecção por Estatística de Alta Ordem. O parâmetro *skewness* verifica as condições de simetria da distribuição do traço sísmico e o *kurtosis* avalia sua curtose. Caso esse valores sejam nulos, a seqüência é Gaussiana. A não gaussianidade é verificada ser os valores das estimativas deixarem de ser nulos.

## 4.4 Construção do modelo de velocidade

A partir dos dados obtidos nas etapas de classificação de reta das primeiras quebras (capítulo 3), e detecção do instante de chegada da PmP na região do ponto crítico (seção 4.3), constrói-se um modelo inicial de velocidades para a crosta e o manto superior. Os parâmetros de velocidade média da crosta e do manto superior são obtidos com base nas relações geométricas que descrevem o comportamento do grupo de fases (Pn e PmP). A mesma regra é aplicada para estimar a profundidade da crosta a partir do grupo de fases PmP.

O modelo considerado nesse trabalho é feito a partir da estimação da velocidade de propagação média e profundidade da crosta, e da velocidade de propagação no manto superior. Os dois primeiros parâmetros são obtidos a partir do modelo matemático que descreve o grupo de fases PmP, e a velocidade no manto é calculada a partir do modelo que constitui a fase Pn [Stein e Wysession 2003].

Para tanto, a seção pode ser dividida em duas etapas: 1) estimação da velocidade no manto superior e 2) estimação da velocidade média e profundidade da crosta. O principal objetivo na construção do modelo é de fornecer uma estimativa inicial consistente, capaz de auxiliar a determinação de uma estrutura crustal mais detalhada. Ao final do processo, tem-se um modelo unidimensional a partir dos parâmetros estimados.

### 4.4.1 Velocidade de propagação no manto superior

#### 4.4.1.1 Determinação da velocidade

Considere o caso mais simples da refração sísmica [Stein e Wysession 2003], onde a crosta é composta por um material homogêneo, e a Moho é uma superfície horizontal plana. Por meio de aplicação direta de relações geométricas, pode-se determinar a velocidade do manto litosférico a partir do modelo matemático que descreve o tempo de trânsito das fases. O modelo descrito para todos os caminhos de propagação obedecem a lei de Snell.

Dentre os possíveis caminhos percorridos pelos grupos de fase nos registros, o único que fornece informações sobre a velocidade de propagação no manto é a fase Pn. Nesse grupo, o alto contraste crescente de velocidade entre a crosta e o manto, fez com que a frente de onda incidente na Moho com ângulo crítico ficasse confinada na parte superior do manto litosférico até retornar para a crosta, com o mesmo ângulo de entrada. A Figura 4.9 mostra um exemplo do caminho percorrido pela Pn até ser registrada pelos sensores.

A velocidade no manto é estimada a partir dos pontos de primeira quebra no tempo de trânsito, classificados como Pn, determinados pelo algoritmo SMF no capítulo 3. O segmento da Pn, definido como  $\mathbf{l}_{Pn} = (\alpha_{Pn}, \rho_{Pn}, \mathbf{Cp}_{Pn}, \mathbf{Cc}_{Pn}, \mathbf{q}_{Pn})$ , contém informações sobre os parâmetros de reta estimados em coordenadas polares  $(\alpha_{Pn}, \rho_{Pn})^T$ , as matrizes de covariância  $\mathbf{Cp}_k$  e  $\mathbf{Cc}_{Pn}$ , e o vetor com os pontos classificados  $\mathbf{q}_{Pn}$  no domínio espaço *versus* tempo.

De acordo com [Stein e Wysession 2003], o tempo de trânsito da Pn baseia-se na distância horizontal percorrida na Moho, dividido pela velocidade do manto  $v_m$ , acrescido dos caminhos

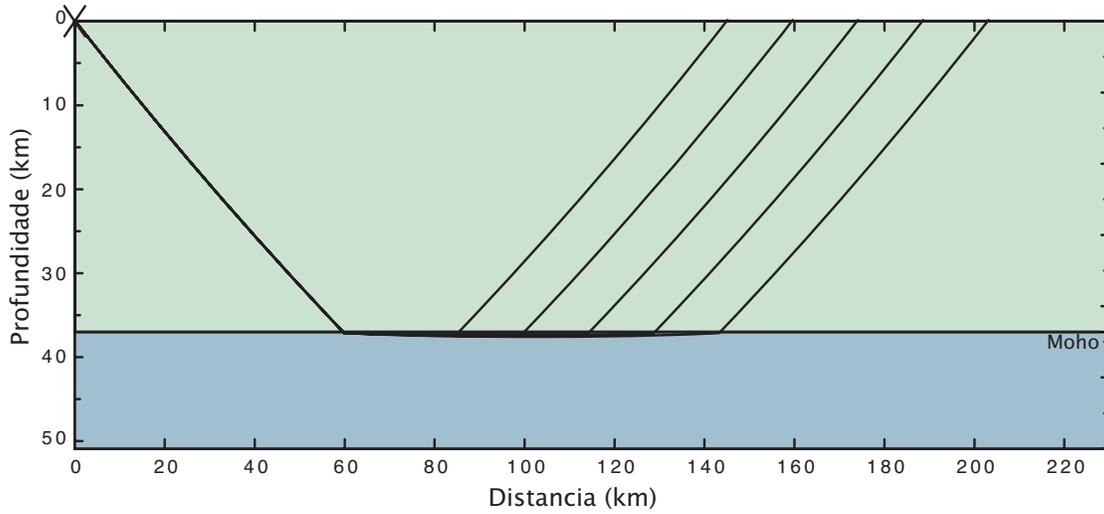


Figura 4.9: Traçado de raio sintético mostrando os prováveis caminhos de propagação da fase Pn.

percorridos (descida e subida) na crosta, dividido por sua velocidade  $v_c$ . A relação é constituída com base na geometria de propagação dos raios é definida da seguinte forma

$$t_{Pn} = \frac{x - 2h_c \tan \theta_{cr}}{v_m} + \frac{2h_c}{v_c \cos \theta_{cr}}, \quad (4.8)$$

onde  $x$  é o espaço percorrido na Moho,  $h_c$  é a profundidade da crosta, e  $\theta_{cr}$  o ângulo crítico de incidência da frente de onda. De acordo com a lei de Snell [Shearer 1999], o ângulo crítico satisfaz a seguinte relação

$$\sin \theta_{cr} = \frac{v_c}{v_m}. \quad (4.9)$$

Através de manipulações algébricas, e utilização de identidades trigonométricas, a equação (4.8) pode ser reescrita como uma equação de segmento de reta [Stein e Wysession 2003]

$$t_{Pn} = \frac{x}{v_m} + 2h_c \left( \frac{1}{v_c^2} - \frac{1}{v_m^2} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (4.10)$$

Relacionando a equação anterior com os parâmetros da Pn, estimados no capítulo 3 e inseridos no vetor (3.31), chega-se à seguinte relação para determinação da velocidade de propagação no manto superior:

$$\hat{v}_m = \frac{\cos(\hat{\alpha}_{Pn})}{\sin(\hat{\alpha}_{Pn})}, \quad (4.11)$$

onde  $\hat{\alpha}_{Pn}$  é o coeficiente angular, estimado em coordenadas polares, que descreve os pontos classificados como Pn.

#### 4.4.1.2 Propagação das incertezas da velocidade

O cálculo do fator de dispersão de  $v_m$ , dado todo processo de extração e classificação por algoritmos apresentados no capítulo 3, é feita de forma semelhante à solução adotada na seção 3.5. A variância de  $v_m$  é determinada a partir da propagação das incertezas acerca da estimação do coeficiente de inclinação do segmento da Pn.

Baseado na relação não-linear da equação (4.11), a variância é calculada utilizando o método da Transformada Unscented [Julier e Uhlmann 2004]. Ao final do processo, tem-se o valor da variância da velocidade  $\delta_{V_m}^2$ . Sua determinação faz-se por meio das relações

$$\begin{aligned} v_m &= f(\alpha_k), \\ \hat{v}_m &= \sum_{i=0}^{2n} \mathbf{W}_i \beta_i, \\ \delta_{V_m}^2 &= \sum_{i=0}^{2n} (v_m - \hat{v}_m)^2, \end{aligned} \tag{4.12}$$

onde  $\beta_i$  são os pontos de inflexão da função de densidade de entrada.

#### 4.4.2 Velocidade de propagação e profundidade da crosta

Ainda no caso mais simples de estrutura crustal, busca-se determinar a velocidade da propagação média  $v_c$ , em km/s, e a profundidade  $h_c$ , em km, da crosta. O grupo de fase PmP é o mais indicado para tal fim. Diferentemente da Pg, que na grande maioria dos casos trata sobre a parte mais rasa, a fase PmP fornece informações de toda extensão da crosta, dado o caminho percorrido pela frente de onda.

Como visto na seção 4.3.1, a PmP consiste na frente de onda compressional refletida na Moho e registrada nos traços sísmicos como fase tardia. Os ângulo de incidência e reflexão são idênticos, formando um caminho de propagação simétrico. A Figura 4.10 mostra o caminho de propagação do traçado de raio para PmP.

Sua curva de tempo de trânsito é geometricamente modelada a partir da seguinte relação [Stein e Wysession 2003]

$$t_{PmP} = 2 \left( \frac{(x^2/4 + h_c^2)^{\frac{1}{2}}}{v_c} \right), \tag{4.13}$$

que pode ser modificada como uma equação de hipérbole

$$t_{PmP}^2 = \frac{x^2}{v_c^2} + \frac{4h_c^2}{v_c^2}. \tag{4.14}$$

Além da característica observada no ângulo de incidência crítico, nota-se que, para distâncias muito maiores que a profundidade da crosta ( $x \gg h_c$ ), a PmP aproxima-se assintoticamente da Pg.

Baseado no princípio de propagação da PmP, o principal objetivo dessa seção é determinar qual o melhor valor do parâmetro  $\Theta = (v_c, h_c)^T$ , na equação (4.14), que melhor adequa-se aos pontos detectados na seção 4.3, para construção do modelo inicial de velocidade para a crosta.

#### 4.4.2.1 Estimação inicial de $\Theta$ pelo Máximo da Verossimilhança

Se considerarmos os pontos de chegada  $(x_j, t_{PmP})$ , provenientes da PmP detectada na seção 4.3, a equação (4.14) pode ser escrita da seguinte forma

$$t_{PmP} = \sqrt{\frac{x_j^2}{v_c^2} + \frac{4h_c^2}{v_c^2}} + w, \quad (4.15)$$

onde  $w$  representa o erro de medição entre o tempo real e o detectado para a chegada da PmP. O erro pode ser representado como uma seqüência Normal com média nula e variância  $\sigma_w^2$ .

O problema apresentado consiste na determinação do parâmetro  $\Theta = (v_c, h_c)^T$  que melhor descreve o tempo de chegada detectado. Como não é possível estabelecer uma relação linear entre os parâmetros existentes, a estimação de  $\Theta$  é feita a partir do estimador do máximo da verossimilhança (MV).

A partir dos pontos detectados, o estimador MV é dado por [Hsu 1997]

$$\hat{\Theta}_{MV} = \arg_{\Theta} \max p(t_{PmP}|\Theta), \quad (4.16)$$

o termo  $p(t_{PmP}|\Theta)$  é a função de verossimilhança, que representa a probabilidade condicional de  $t_{PmP}$ , dado o parâmetro  $\Theta$ .

Considerando  $p_w(w)$  como a função de densidade do erro de medição  $w$ , a função de verossimilhança é propagada da seguinte forma

$$p(t_{PmP}|\Theta) = p_w \left( t_{PmP} - \sqrt{\frac{x^2}{v_c^2} + \frac{4h_c^2}{v_c^2}} \right). \quad (4.17)$$

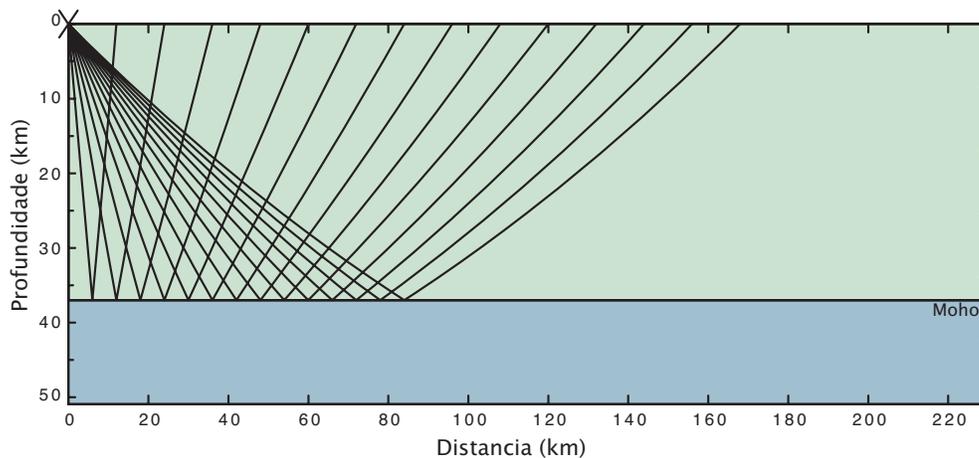


Figura 4.10: Traçado de raio sintético com os possíveis caminhos de propagação da fase PmP.

Se  $w \sim N(0, \sigma_w^2)$ , então

$$p(t_{PmP}|\Theta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_w} e^{-\frac{\left(t_{PmP} - \sqrt{\frac{x_j^2}{v_c^2} + \frac{4h_c^2}{v_c^2}}\right)^2}{2\sigma_w^2}}. \quad (4.18)$$

Como a distância  $x_j$  do sensor, em relação à fonte, é fixa, e os tempos de chegada da PmP  $p(t_{PmP}|\Theta) = p(t_1, \dots, t_J|\Theta)$  são independentes e identicamente distribuídos, (4.18) pode ser escrito na forma

$$p(t_{PmP}|\Theta) = \prod_{j=1}^J \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_w} e^{-\frac{\left(t_j - \sqrt{\frac{x_j^2}{v_c^2} + \frac{4h_c^2}{v_c^2}}\right)^2}{2\sigma_w^2}}. \quad (4.19)$$

Com isso, a função de verossimilhança será máxima para o valor  $\Theta$  que satisfizer todos os pontos  $(t_j, x_j)$  classificados como PmP. Devido à complexidade analítica do problema, métodos numéricos são utilizados para estimação dos valores de  $\Theta$ .

O método abordado neste trabalho consiste na discretização das possíveis estimativas de  $\Theta$ . Uma grade de busca, com intervalos definidos para  $v_c$  e  $h_c$ , é construída para determinar quais as estimativas dentro do espaço de solução que melhor descrevem os tempos de chegada da PmP detectados. Os limites da grade devem ser escolhidos de acordo com o ambiente geotectônico do local onde o levantamento de refração sísmica foi realizado. A definição dos valores tem como base a compilação dos estudos de refração profunda realizados por [Christensen e Mooney 1995] e são mostrados na Tabela 1.1. Além dos valores estabelecidos para velocidade e espessura média da crosta global, limites para ambientes orógeno, escudo e plataforma, arco magmático, rift e crosta estirada podem ser selecionados. Se os dados de refração utilizados são provenientes da região de crosta estirada, por exemplo, os valores de grade estarão entre 6,19 – 6,43 km/s para  $v_c$ , e 25,3 – 35,8 km para  $h_c$ .

Para cada valor considerado, dois vetores,  $\hat{\mathbf{v}}_c$  e  $\hat{\mathbf{h}}_c$ , de tamanho  $N$ , com intervalos  $\Delta v_c$  e  $\Delta h_c$  regulares, são criados, e uma matriz  $N \times N$  é montada a partir da combinação dos vetores. Para cada ponto da grade  $(\hat{v}_{cn}, \hat{h}_{cn})$ , calcula-se o valor de  $p(t_{PmP}|\Theta)$ .

A estimativa de  $\hat{\Theta}_{mv}$  é determinada como o ponto da grade  $(\hat{v}_{cn}, \hat{h}_{cn})$  que apresenta o maior valor para função de verossimilhança em (4.19). Calcula-se a matriz de covariância  $\mathbf{C}_\Theta$  a partir análise da densidade marginal de  $p(t_{PmP}|v_{mv})$  e  $p(t_{PmP}|h_{mv})$  e definida como

$$\mathbf{C}_\Theta = \begin{bmatrix} \sigma_v^2 & \rho\sigma_v\sigma_h \\ \rho\sigma_h\sigma_v & \sigma_h^2 \end{bmatrix}, \quad (4.20)$$

onde  $\sigma_v$  e  $\sigma_h$  representa o desvio padrão de  $\hat{v}_{mv}$  e  $\hat{h}_{mv}$ , e  $\rho$  é o coeficiente de correlação entre as funções de densidade marginais. A matriz  $\mathbf{C}_\Theta$  é simétrica e  $\rho\sigma_h\sigma_v = \rho\sigma_v\sigma_h$ .

#### 4.4.2.2 Diminuição do efeito de discretização do parâmetro $\Theta$

Apesar da estimativa do máximo da verossimilhança, seus resultados restringem-se somente para o intervalo estipulado pela discretização dos possíveis valores de  $\Theta$ . A diminuição desse

intervalo acarretaria em melhores estimativas, mais próximas do valor real. No entanto, a relação entre o tamanho do o espaço de grade e o custo computacional é direta. Outra limitação em utilizar grades de busca é a definição prévia e a uniformidade em sua construção, que não pode ser dividida ou arranjada, de modo a prover maior resolução em regiões de maior probabilidade, exceto se um conhecimento *a priori* for utilizado [Arulampalam et al. 2002].

Uma alternativa para minimizar o efeito da discretização, sem aumentar drasticamente custo computacional do processo, consiste assumir o parâmetro  $\Theta$  como uma variável aleatória, com função de densidade  $p_{\Theta}(\Theta)$ . Com isso pretende-se calcular estimativas, a partir do paradigma Bayesiano, que minimizem o erro  $w$  em pontos localizados entre os intervalos de discretização, seguindo um comportamento previamente estabelecido.

O principal objetivo está na obtenção de amostras consistentes com base nos tempos de chegada  $t_{PmP}$ , e na função  $p(\Theta)$ , definida *a priori*. Dado o vetor contendo os tempo de chegada na região de ponto crítico, definidos na seção 4.3,  $\mathbf{t}_{PmP}$ , a regra de Bayes é aplicada

$$p(\theta|t_{PmP}) = \frac{p(t_{PmP}|\Theta) p(\Theta)}{p(t_{PmP})}, \quad (4.21)$$

onde  $p(t_{PmP}|\Theta)$  é a função do máximo da verossimilhança e  $p(\Theta)$  é a função de densidade inicial de  $\Theta$ .

Define-se a densidade *a priori* do parâmetro  $\Theta = (v_c, h_c)^T$  como uma função de distribuição Gaussiana, com média  $\hat{\Theta}$  e matriz de covariância  $\mathbf{C}_{\Theta}$ . A média  $\hat{\Theta}$  foi obtida pela discretização do espaço de soluções, e  $\mathbf{C}_{\Theta}$  consiste na matriz de covariância obtida pela estimação do máximo da verossimilhança. A distribuição  $p(t_{PmP}|\Theta)$  segue o mesmo desenvolvimento aplicado na seção anterior, com exceção da grade de busca de dados. A função de densidade  $p(t_{PmP})$  não é conhecida, mas atua como um fator multiplicativo na equação (4.21), que, para estimação do máximo *a posteriori* (MAP), é simplificada da seguinte maneira [Duda e Stork 2000]

$$p(\theta|t_{PmP}) \propto p(t_{PmP}|\Theta) p(\Theta), \quad (4.22)$$

onde se estabelece apenas uma relação de proporcionalidade na obtenção da função de densidade  $p(\Theta|t_{PmP})$ , o que não altera a estimação de  $\Theta$ .

A estimação de  $\Theta$  é feita através de aproximação numérica da distribuição de  $p(\Theta|t_{PmP})$  utilizando a técnica SIR (*Sampling Importance Resampling*). A concepção do método encontra-se em gerar amostras seguindo  $p(\Theta)$  (*Sampling*), selecionar as principais utilizando uma função de importância (*Importance*), e reamostrar, na proporção da função de verossimilhança e um modelo de validação, de modo a obter amostras de  $p(\Theta|t_{PmP})$ .

Considere a seguinte relação

$$p(\Theta|t_{PmP}) = \frac{f(\Theta)}{\int_{-\infty}^{+\infty} f(\Theta)d\Theta}, \quad (4.23)$$

onde  $f(\Theta) = p(t_{PmP}|\Theta)p(\Theta)$ . O método da aceitação/rejeição é aplicado para gerar as amostras caso exista uma constante  $M$  que satisfaça a seguinte relação para todo o intervalo de interesse

$$p(t_{PmP}|\Theta)p(\Theta) \leq M p(\Theta). \quad (4.24)$$

O método da aceitação/rejeição consiste em gerar amostras de uma distribuição auxiliar conhecida, e corrigi-las por meio de um mecanismo, para que seus valores representem a distribuição de interesse. O forte apelo intuitivo da técnica faz com que as amostras de  $M p(\Theta)$  mais próximas de  $p(t_{PmP}|\Theta)p(\Theta)$  tenham maior probabilidade de serem sorteadas.

O procedimento básico deste gerados consiste nos seguintes passos:

1. Geram-se amostras de  $\Theta \sim p(\Theta)$  e  $u \sim U(0, 1)$  (distribuição uniforme);
2. Se  $u \leq p(t_{PmP}|\Theta)p(\Theta) / Mp(\Theta)$ , aceitar como amostra. Senão, voltar para o passo anterior.

A aplicação do método de aceitação/rejeição para estimação Bayesiana é útil, uma vez que não é necessário conhecer a distribuição  $p(t_{PmP})$ , pois é meramente um fator multiplicativo na Regra de Bayes.

Se a constante  $M$  não for conhecida, as amostras de  $p(\Theta|t_{PmP})$  podem ser geradas de outra forma. Dado  $N$  amostras  $\Theta_1, \Theta_2, \dots, \Theta_N$ , geradas a partir da função de densidade  $p(\Theta)$ , calcula-se a probabilidade

$$q_n = \frac{p(t_{PmP}|\Theta_n)}{\sum_{n=1}^N p(t_{PmP}|\Theta_n)}, \quad (4.25)$$

onde  $q_n$  é a probabilidade da amostra  $\Theta_n$  dentro do espaço gerado. Uma amostra  $\Theta^*$ , com probabilidade  $q_n$ , é escolhida para teste. Verifica-se que  $\Theta^*$  é amostra de  $p(\Theta|t_{PmP})$  a partir da relação

$$Pr\{\Theta^* \leq a\} = \sum_{n=1}^N q_n \cdot u(\Theta_n - a), \quad (4.26)$$

onde  $u(\Theta_n - a)$  é uma distribuição normal com

$$u(\Theta_n - a) = \begin{cases} 1, & \text{se } \Theta_n \leq a \\ 0, & \text{caso oposto} \end{cases} \quad (4.27)$$

A partir das equações (4.25)-(4.27), tem-se a seguinte distribuição

$$Pr\{\Theta^* \leq a\} = \frac{\sum_{n=1}^N p(t_{PmP}|\Theta_n) \cdot u(\Theta_n - a)}{\sum_{i=1}^N p(t_{PmP}|\Theta_i)}, \quad (4.28)$$

onde, se considerarmos o número de amostras  $N \rightarrow \infty$ , temos

$$\lim_{N \rightarrow \infty} Pr\{\Theta^* \leq a\} = \frac{\int_{-\infty}^a p(t_{PmP}|\Theta) d\Theta}{\int_{-\infty}^{\infty} p(t_{PmP}|\Theta) d\Theta} = Pr\{\Theta \leq a|t_{PmP}\}. \quad (4.29)$$

Como a densidade de  $Pr\{\Theta \leq a|t_{PmP}\}$  é  $p(\Theta|t_{PmP})$ , a amostra selecionada  $\Theta^*$  é considerada como uma amostra pertencente à distribuição desejada. Ao fim do processo de estimação computacional, teremos uma população de amostras com densidade  $p(\Theta|t_{PmP})$ . Essa população serve como base para o cálculo do parâmetro  $\hat{\Theta}$ , obtido com a média dos pontos gerados, e a incerteza de cada componente de  $\hat{\Theta}$ , calculada a partir da dispersão dos parâmetros  $v_c$  e  $h_c$ .

A principal vantagem em utilizar o método SIR para ajustar o parâmetro  $\Theta$ , concentra-se na possibilidade de redução do efeito de discretização, causada pela adoção de uma grade de busca de

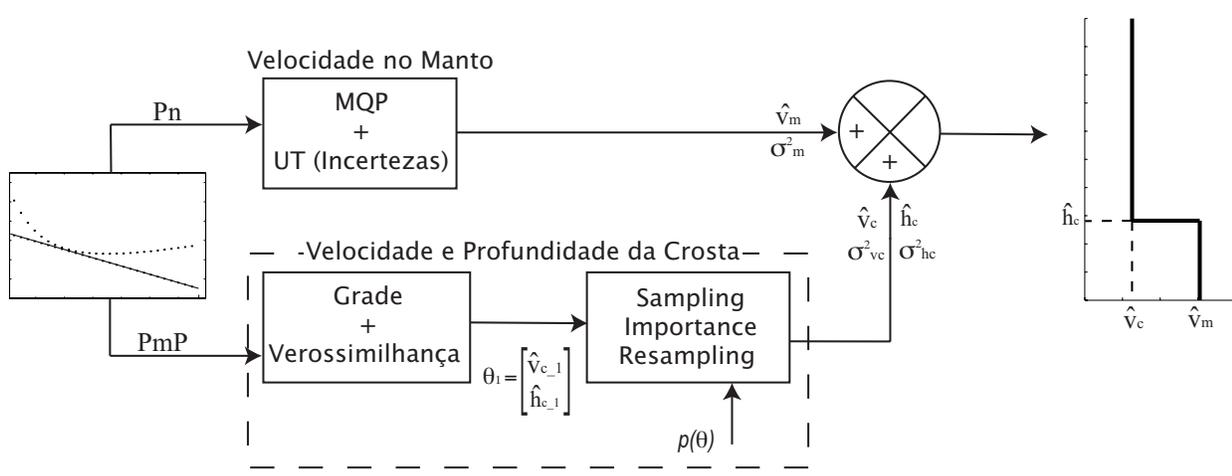


Figura 4.11: Diagrama em blocos do algoritmo para construção do modelo de velocidades.

tamanho reduzido e comportamento uniforme. Ao contrário dos algoritmos de busca por grade, o SIR possui peso computacional menor do que grades muito densas por apresentar uma população de tamanho constante. Entretanto, para obter uma maior significância na estimação de  $\Theta$ , essa população deve ser suficientemente grande.

#### 4.4.3 Resumo do algoritmo

A construção do modelo inicial de velocidade pode ser resumida na determinação de três grandezas: velocidade de propagação na crosta  $v_c$ , profundidade da crosta  $h_c$  e velocidade de propagação no manto superior  $v_m$ . Apesar da teoria de construção do modelo aplicar-se à frentes de onda de qualquer natureza, o presente trabalho focou o método somente em fases compressoriais. A determinação da profundidade não depende de qual tipo de onda é considerada, desde que seja da mesma natureza durante todo o processo. Utilização das ondas compressoriais foi motivada, principalmente, pela viabilidade de detecção das primeiras quebras, auxiliando na determinação do tempo de chegada da fase tardia.

As incertezas associadas ao modelo foram calculadas separadamente para região do Moho e na crosta. Em  $v_m$ , a variância  $\delta_{v_m}^2$  foi determinada por meio Transformada *Unscented*. Esse método foi escolhido devido à relação não-linear entre a estimativa desejada e os parâmetros de suporte, dados por  $\mathbf{l}_k$ . Para  $v_c$  e  $h_c$ , o erro de estimação foi propagado pela metodologia SIR para geração dos possíveis valores seguindo a distribuição desejada. Entretanto, o parâmetro de dispersão  $\delta_{mv}$ , para calcular a estimativa inicial  $\Theta_{mv}$  deve ser determinado pelo usuário.

O diagrama em blocos mostra o esquema dos principais processos envolvidos na determinação do modelo crustal. Note que, apesar da fraca dependência entre eles, cada processo necessita de diversos valores na entrada. A Figura 4.11 mostra um diagrama em blocos exemplificando o funcionamento do processo de construção do modelo de velocidades.

## 4.5 Considerações finais

Este capítulo apresentou metodologias para detecção do tempo de chegada da PmP, e construção de um modelo inicial de velocidades. A detecção da PmP fundamenta-se partir de técnicas para realçar a ocorrência do tempo de chegada, e da utilização das informações obtidas da fase Pn. A construção do modelo inicial de velocidades é feita a partir da obtenção da velocidade média de propagação no manto superior  $v_m$  e na crosta  $v_c$ , e do cálculo da profundidade crustal. A estimativa e os parâmetros de incerteza de  $v_m$ , são obtidos pelos pontos da Pn. Para as grandezas relativas à crosta  $(v_c, h_c)^T$ , utiliza-se informações contidas na formação da fase PmP.

Para detecção do tempo de chegada da PmP, quatro técnicas diferentes foram implementadas de modo a adaptar-se ao tipo e/ou qualidade do sinal sísmico. Em todas as técnicas implementadas, o ponto inicial de busca no traço foi determinado pela extensão do grupo fase Pn até a região de ponto crítico da PmP. Essa região caracteriza-se pelo alto coeficiente de refletividade da frente de onda que incide na Moho, auxiliando no problema de detecção de fase. Ao final do processo, uma lista do grupo de fase, onde estão inseridos todos os pontos  $(x_n, t_n)^T$ , é criada para o cálculo dos parâmetros referentes à crosta.

A velocidade de propagação no manto superior é estimada a partir dos parâmetros disponíveis dentro do segmento do grupo  $P_n$ , classificado no capítulo 3. A velocidade é determinada de acordo com a inclinação do segmento da  $P_n$ . A variância da velocidade estimada é calculada aplicando-se a Transformada Unscented nos pontos de suporte, baseado no processo de transformação de coordenadas para determinação de  $v_m$ . A estimação de  $v_c$  e  $h_c$  foi realizada de forma conjunta, a partir da relação de tempo de trânsito da fase PmP. O método de estimação utilizado consistiu na implementação de uma grade de busca pelo máximo da verossimilhança, para determinar as características iniciais do parâmetro  $\Theta_{mv} = (v_c, h_c)^T$ . De posse da estimativa inicial, aplicou-se o algoritmo SIR (*Sampling Importance Resampling*), para reduzir o efeito causado pela discretização. Ao final de todo o processo, constrói-se o modelo de velocidades médio para determinação de um estrutura inicial da crosta, objetivo proposto por este trabalho.

# Capítulo 5

## Resultados Experimentais

### 5.1 Introdução

A validação dos métodos apresentados nos capítulos 2, 3 e 4 é feita a partir de uma base de dados sintético e real de levantamentos de refração sísmica profunda voltados para estudos da estrutura da crosta e manto superior. Utilizando sismogramas compostos como ponto de partida, o objetivo principal concentra-se na detecção e classificação de informações e padrões, dado o espaço de dados disponível. Os processos empregados visam analisar os dados de forma automática e construir modelo inicial de uma camada com distribuição de velocidades para crosta e manto superior.

Este capítulo mostra os resultados de cada algoritmo, baseando-se nos dados e parâmetros apresentados antes de sua realização. Cada processo é avaliado de maneira comparativa, onde os dados e parâmetros reais servem como referência de desempenho. Ao final, são feitas avaliações e considerações acerca do resultado de cada algoritmo.

O processo para construção do modelo pode ser dividido em 4 etapas: 1) detecção das primeiras chegadas nos traços do sismograma composto, 2) classificação dos pontos detectados em grupos de fase progressivos, 3) detecção do tempo de chegada da reflexão PmP, 4) estimação da  $V_p$  média da crosta e manto superior e a profundidade da Moho. Ao final do processo de estimação o modelo de velocidades de uma camada é construído. Em cada etapa, parâmetros iniciais determinam o modo de operação de cada algoritmo. O ajuste faz-se necessário partindo do princípio que levantamentos possuem diferentes características, como nível de ruído ou espaçamento entre os sensores instalados na linha sísmica.

O primeiro processo abordado é a detecção das primeiras quebras em sismogramas compostos (capítulo 2). O método busca a caracterização do ruído sísmico de fundo em modelos autoregressivos (AR), e observa a evolução de seus coeficientes utilizando filtro de Kalman. O rastreamento do modelo baseia-se nas amostras passadas do traço, supondo um sistema de evolução de primeira ordem. Teste estatístico qui-quadrado verifica o comportamento do modelo AR estabelecido e, caso haja alguma alteração, a chegada da fase é identificada.

Pontos  $(x_j, t_j)$  detectados são utilizados como entrada para o processo de identificação e clas-

sificação dos grupos de fases direta e refratada. O problema é resolvido com a implementação de algoritmo de segmentação de retas para identificação dos trechos. A classificação em grupos de fase é feita investigando-se a inclinação de cada segmento extraído. Os grupos classificados servem como base para construção do modelo de velocidades.

A detecção da PmP é importante para obter a  $V_p$  média da crosta. Características como alto coeficiente de reflexão na Moho e encontro com o grupo de fase Pn na região de incidência crítica, são utilizados na determinação do tempo de chegada. Assim que identificados, os pontos pertencentes à PmP são agrupados e utilizados como parâmetro de entrada na estimação da velocidade média da crosta e profundidade da Moho.

A estimação da estrutura da crosta é feita em duas etapas: 1) estimação da velocidade da fase compressional no manto  $v_m$ , e 2) da velocidade média da crosta e profundidade da Moho ( $v_c, t_c$ ). A velocidade no manto é estimada com base no coeficiente angular do grupo de fase Pn. A estimação de  $v_c$  e  $h_c$  deu-se pela busca em grade dos parâmetros  $\hat{v}_c$  e  $\hat{h}_c$  que maximizam a função do máximo da verossimilhança do resíduo entre o tempo detectado e a equação que descreve a PmP. A estimação por SIR foi aplicada para reduzir os efeitos causados pela discretização do processo de busca. O modelo de velocidade que descreve a crosta média e o manto superior é construído a partir das estimativas.

Com exceção da construção do modelo de velocidade, as saídas dos blocos são utilizadas como parâmetro de entrada para que o processo seguinte seja realizado. Os códigos implementados foram subdivididos de acordo com a função específica a ser desempenhada. O caráter modular facilita a implementação e diminui consideravelmente o tempo gasto para procura de eventuais problemas de simulação. Os processos foram escritos em linguagem Matlab 6.5.

Para validação da metodologia sugerida, dados sintéticos e reais foram utilizados. Cada base de dados é composta por uma linha sísmica, com os parâmetros de velocidade e profundidade determinados, e dois sismogramas compostos. Os sismogramas sintéticos foram gerados a partir de um modelo simples, simulados em um software de modelagem direta. Os dados reais advêm de trabalhos realizados na região norte do estado de Goiás, no intuito de estudar a estrutura crustal da Província Tocantins. Os sismogramas compostos são resultados de levantamentos de refração sísmica profunda realizados na região.

Os sismogramas utilizados são provenientes dos tiros localizados nos extremos das linhas sísmicas. Esses tiros são denominados de direto e reverso. Por possuir maior espaço de registro em um único sentido, os tiros diretos e reversos são capazes de registrar as fases refratadas na Moho (Pn), como primeira quebra, o que não é verificado em tiros realizados no meio da linha. A utilização de tiros extremos permite inferir sobre o comportamento morfológico da crosta, como possível mergulho, ou pontos de descontinuidade na Moho.

A organização deste capítulo partiu do princípio da análise separada de cada base de dados. A seção 5.2 valida o método proposto utilizando sismogramas sintéticos. Dados reais são utilizados para estimar os parâmetros crustais e apontar as principais dificuldades na aplicação do algoritmo, dados às condições impostas em um experimento de refração sísmica profunda. Os dados reais são experimentos de Cavalcante e Porangatu, localizados na Província Tocantins, dentro do estado de Goiás (seção 5.3).

## 5.2 Construção do modelo de velocidade utilizando dados sintéticos

### 5.2.1 Detecção das primeiras chegadas

O sismograma composto apresentado considera o meio de validação sintético (Figura 1.8) como homogêneo e perfeitamente elástico. Isso implica em um meio onde não existem perdas nos traços sísmicos devida a absorção natural e espalhamento geométrico, resultando na forma de onda bem definida no momento de sua chegada. Com exceção das chegadas das fases refratadas na Moho, a amplitude e o conteúdo espectral do traço é bem semelhante à forma de onda da Figura 1.9 utilizada para gerar o sismograma composto.

Para simular o ruído de fundo presente no traço, uma seqüência Gaussiana, com média nula e variância correspondente a 5% do valor máximo de amplitude do registro, foi adicionada para simular um traço real. A adição de uma seqüência branca tem como objetivo representar o ruído de fundo encontrado em um registro real. A Figura 5.1 mostra um traço sintético limpo em (A), e contaminado por uma seqüência Gaussiana em (B).

Para iniciar o processo de detecção, é necessário que parâmetros de controle e ajuste do sistema de identificação sejam definidos de antemão. A ordem do modelo AR, os valores das incertezas associadas  $\mathbf{Q}$  e  $R$ , e os valores iniciais dos coeficientes de  $\mathbf{x}[0]$  e da matriz de covariâncias  $\mathbf{P}[0]$  foram definidos.

O modelo AR adotado para os dados sintéticos é de segunda ordem. O modelo foi dimensionado levando-se em consideração a confiabilidade da seqüência branca gerada para o traço sintético. A matriz de incertezas  $\mathbf{Q}$ , de tamanho  $4 \times 4$ , foi ajustada em sua diagonal principal. O cálculo da incerteza de medição  $R$  foi feito com base na equação (2.27). Esses parâmetros estão na Tabela 5.1.

O algoritmo recursivo de Durbin-Levinson (seção 2.3.2) calculou o valor inicial dos coeficientes do modelo AR  $\mathbf{x}[0]$ , a partir de um intervalo de amostras que caracterizavam o ruído de fundo. Esse cálculo é realizado para cada traço para melhor adaptar-se às características do ruído de fundo local. A matriz de covariância inicial é definida com um valor suficientemente alto para evitar divergência do filtro de Kalman. O valor determinado para a matriz de ordem  $6 \times 6$  dos dados sintéticos foi de  $p_{jj}[0] = 100|j = 1, \dots, 6$ .

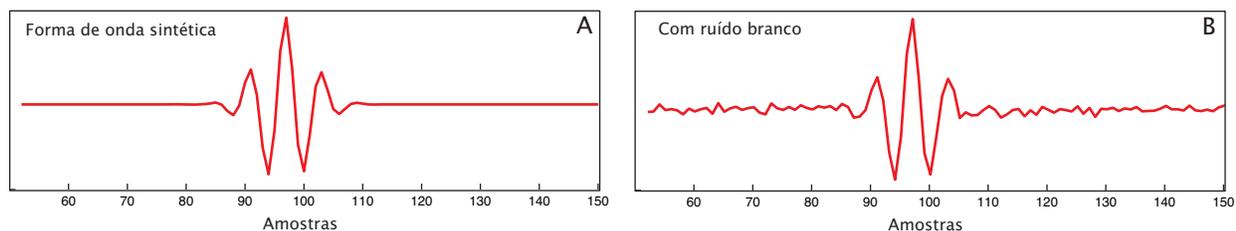


Figura 5.1: Adição de ruído de fundo ao traço sintético. O traço em (A) representa a forma de onda gerada para uma fases. A adição de uma seqüência Gaussiana, com média zero e variância de 5% do valor máximo do traço resulta na forma de onda (B).

Tabela 5.1: Parâmetros iniciais utilizados no algoritmo de detecção por filtragem recursiva. Os valores  $q_{11} \dots q_{44}$  são relativos à diagonal principal da matriz de incerteza do modelo  $\mathbf{Q}$ .

$\mathbf{Q}$ (ordem 2)		
$q_{11}, q_{22}$	$q_{33}, q_{44}$	$R (s^2)$
$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-5}$	0,3

A Figura 5.2 mostra o resultado do processo de detecção para os tiros direto e reverso. Os pontos em vermelho indicam a tempo apontado pelo algoritmo. O tempos de chegada real, detectados pelo algoritmo e a distância dos traços da fonte controlada, estão na Tabela 5.2.

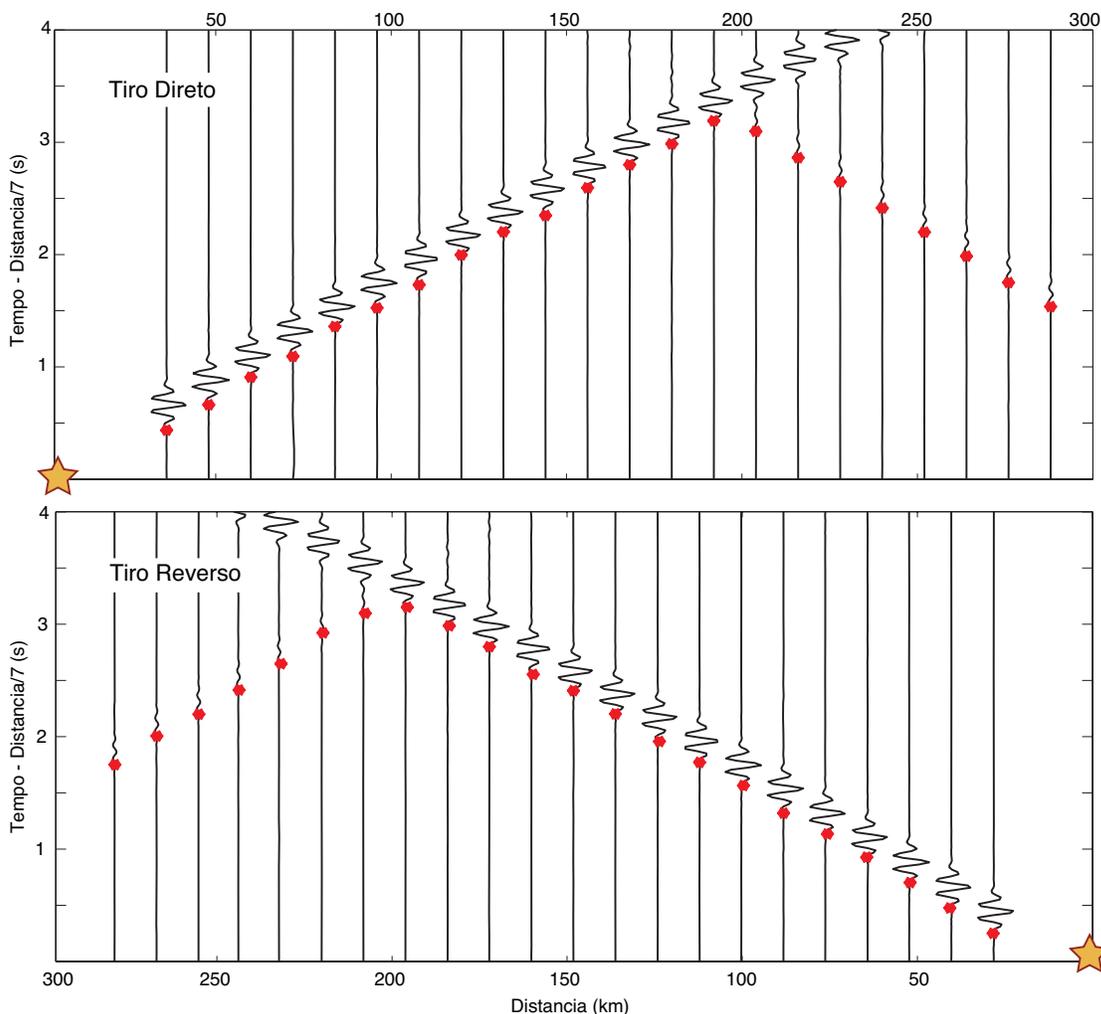


Figura 5.2: Resultado da detecção de primeiras quebras nos sismogramas sintéticos para os tiros direto e reverso. As estrelas representam a posição dos tiros no perfil. Os pontos em vermelho indicam o tempo de chegada detectado pelo algoritmo. Os traços foram gerados com um período de amostragem  $T_{acq} = 0,02$  segundos. Para facilitar visualização, os perfis foram reduzidos em 7 km/s.

Tabela 5.2: Resultado da detecção das fases para os registros sintéticos. Os valores em destaque ( $t_{kf}$ ) representam os tempos de chegada detectados pelo algoritmo.

Tiro Direto			Tiro Reverso		
Dist. (km)	Tempo real (s)	$t_{kf}$ (s)	Tempo real (s)	$t_{kf}$ (s)	Dist (km)
			3,54	<b>3,68</b>	24
36	5,48	<b>5,58</b>	5,48	<b>5,62</b>	36
48	7,40	<b>7,52</b>	7,40	<b>7,56</b>	48
60	9,34	<b>9,48</b>	9,34	<b>9,50</b>	60
72	11,26	<b>11,38</b>	11,26	<b>11,42</b>	72
84	13,20	<b>13,36</b>	13,20	<b>13,20</b>	84
96	15,14	<b>15,24</b>	15,14	<b>15,28</b>	96
108	17,10	<b>17,16</b>	17,10	<b>17,20</b>	108
120	19,02	<b>19,14</b>	19,02	<b>19,10</b>	120
132	20,96	<b>21,06</b>	20,96	<b>21,06</b>	132
144	22,84	<b>22,92</b>	22,84	<b>22,98</b>	144
156	24,74	<b>24,88</b>	24,74	<b>24,84</b>	156
168	26,66	<b>26,80</b>	25,60	<b>26,80</b>	168
180	28,56	<b>28,70</b>	28,56	<b>28,70</b>	180
192	30,46	<b>30,62</b>	30,46	<b>30,58</b>	192
204	32,12	<b>32,24</b>	32,12	<b>32,24</b>	204
216	33,56	<b>33,72</b>	33,56	<b>33,78</b>	216
228	35,06	<b>35,22</b>	35,06	<b>35,22</b>	228
240	36,54	<b>36,70</b>	36,54	<b>36,70</b>	240
252	38,04	<b>38,20</b>	38,04	<b>38,20</b>	252
264	39,52	<b>39,70</b>	39,52	<b>39,72</b>	264
276	41,02	<b>41,18</b>	41,02	<b>41,18</b>	276
288	42,50	<b>42,68</b>			

Observa-se que o atraso entre o tempo de chegada real e detectado tem uma diferença média de 0,10 segundos para os traços diretos e 0,11 segundos para os traços reversos. Essa diferença é explicada pelo ruído de fundo inserido no traço, gerando um pequeno resíduo no processo de detecção. Devido à seqüência branca, o efeitos causados influenciaram os resultados de detecção de forma diferente. A Figura 5.3A mostra o detalhe da detecção em um determinado traço do sismograma. A distância de Mahalanobis calculada para o traço é representada na Figura 5.3B.

O comportamento ao longo do tempo dos coeficientes  $\mathbf{x}[k]$  e da matriz de covariâncias  $\mathbf{P}[k]$  é observado na Figura 5.4. Para o modelo AR de segunda ordem, nota-se que, no instante do evento, os valores dos coeficientes sofrem um ligeira alteração. Os componentes da matriz  $\mathbf{P}[k]$ , no entanto, tem o valor reduzido consideravelmente. Após a chegada da fase, o valor da variância diminui significativamente, ficando menor que o valor dos coeficientes AR. A Figura 5.4 mostra esse comportamento no instante da chegada do evento.

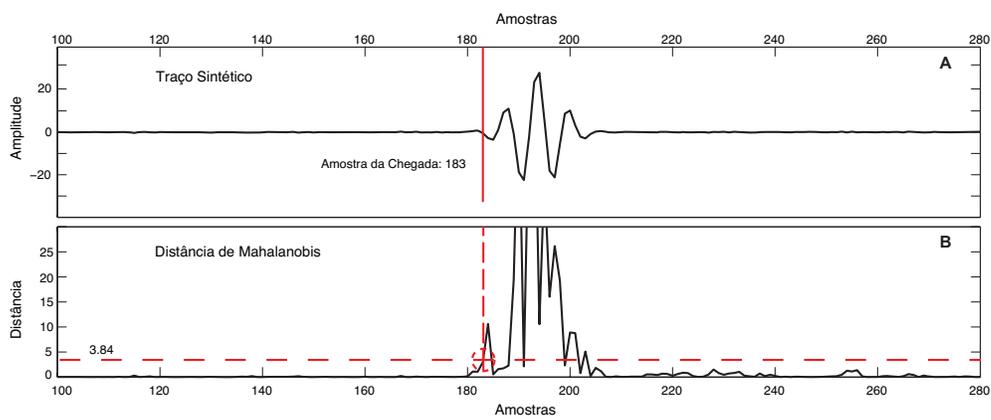


Figura 5.3: Detalhe do processo de detecção de um determinado traço do sismograma. A linha em vermelho representa o tempo de chegada identificado, enquanto a linha preta mostra o tempo em que o SEIS88 iniciou a geração da fase do traço (A). A distância de Mahalanobis foi calculada durante o instante de identificação. A linha horizontal tracejada mostra o limiar do teste estatístico de 3,84.

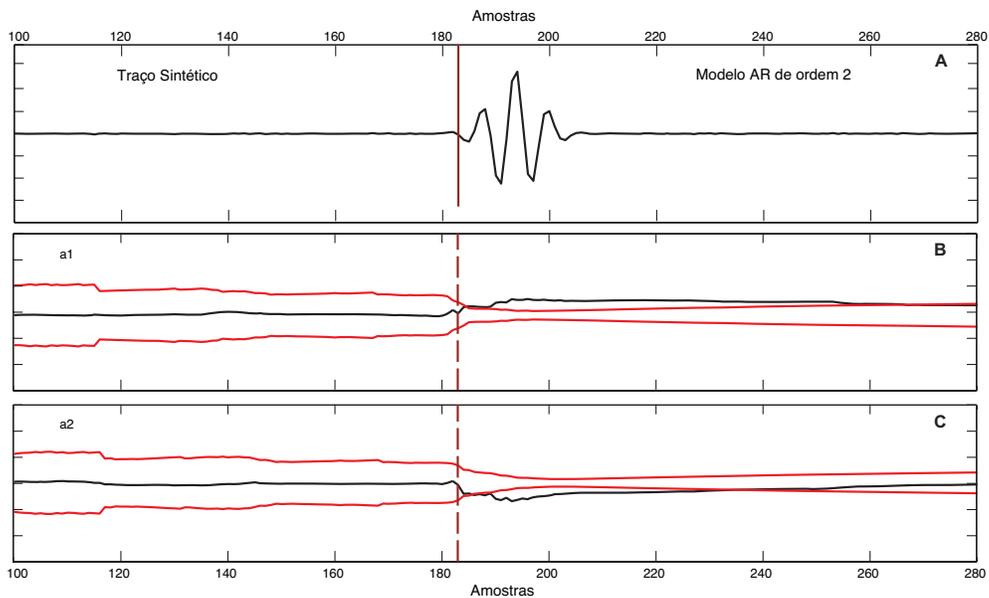


Figura 5.4: Comportamento dos coeficientes AR e no seu intervalo de confiança. O traço sísmico com a chegada identificada é mostrado em (A). Os coeficientes AR de ordem 2 estão representados em (B) e (C). Os traços em vermelho representam a evolução temporal da matriz de covariância  $\mathbf{P}[k]$ . Note a alteração no comportamento dos coeficientes AR e na matriz no instante de ocorrência e logo após a chegada da fase.

### 5.2.2 Extração de segmentos de reta e classificação em grupos de fase

Baseado na detecção no tempo de chegada das primeiras chegadas nos traços sintéticos, é feito o agrupamento dos pontos em segmentos de reta para classificação em grupos de fase Pg e Pn. O método SMF é aplicado aos dados obtidos nos perfis direto e reverso.

Objetivando manter uniformidade do método para perfis diretos e reversos, a posição dos traços

em relação ao ponto de origem é invertida para comportar-se como um perfil direto. Dessa forma, a metodologia apresentada na classificação dos segmentos extraídos não precisa ser adaptada para trabalhar com segmentos com inclinação negativa. A Figura 5.5 mostra os segmentos extraídos para os perfis direto (Figura 5.5A) e reverso (Figura 5.5B). O parâmetro adotado para dispersão máxima dos pontos foi  $\delta_{max} = 11$  em ambos casos.

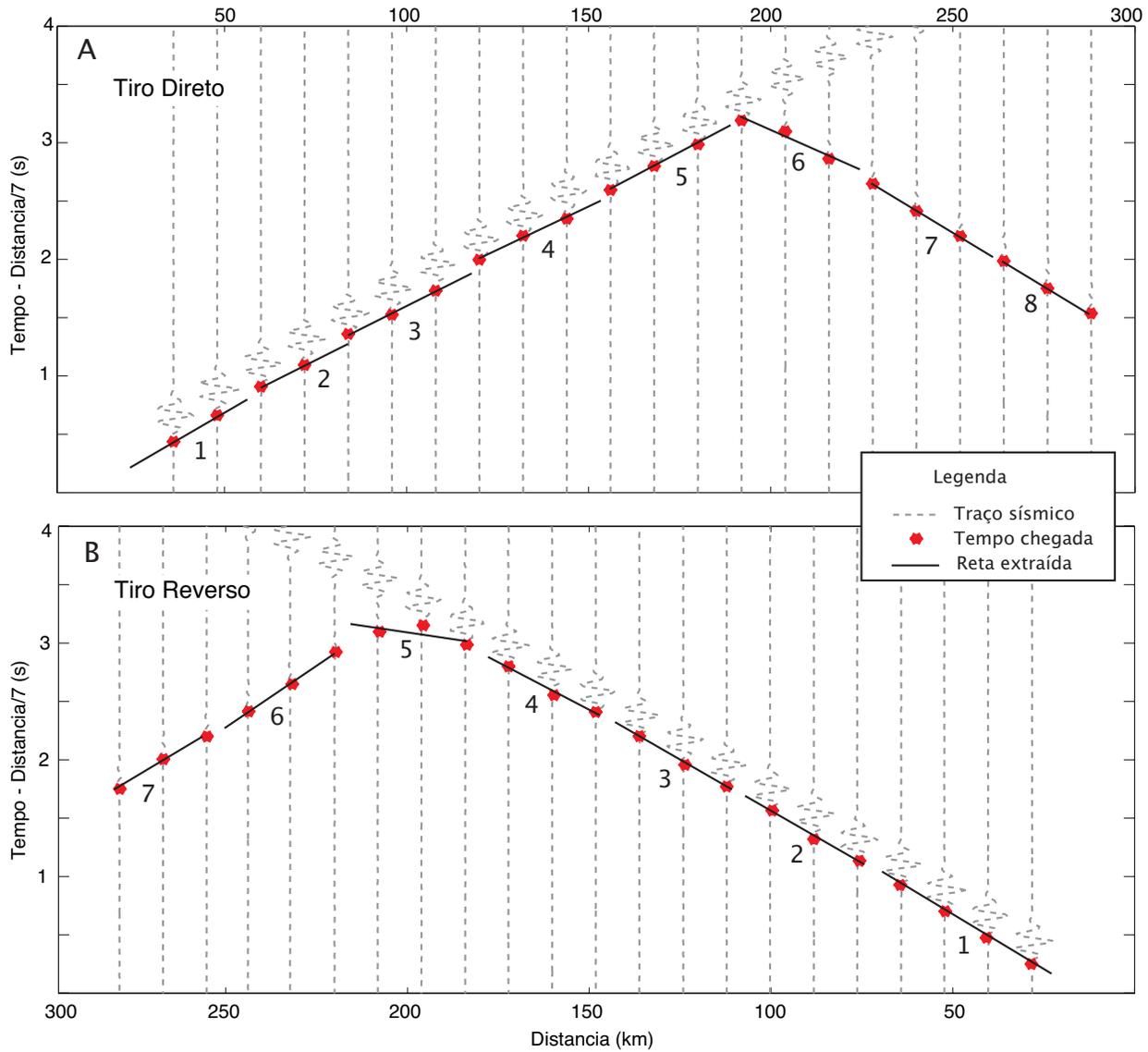


Figura 5.5: Resultado da extração de retas para os perfis direto (A) e reverso (B). Os segmentos numerados de 1 a 8 no perfil direto, e 1 a 7 no reverso, foram extraídos no método SMF. Em ambos os perfis,  $\delta_{max} = 11$  e redução de velocidade de 7 km/s.

Tabela 5.3: Resultado do processo de extração de segmentos por SMF nos dados sintéticos. Os valores nos campos indicam os parâmetros relativos às coordenadas polares ( $\rho, \alpha$ ), os pontos de suporte  $(x, t)^T$ , e o peso de similaridade em cada ponto. O valor em  $x$  representa a distância em relação ao ponto de tiro.

<b>Tiro Direto</b>					
Segmento	$\rho$	$\alpha$	x (km)	t (s)	Vetor peso
1	34,722	0,1594	[36,0 48,0]	[5,6 7,5]	[0,74 0,50]
2	66,978	0,1570	[60,0 72,0]	[9,5 11,4]	[0,74 0,79]
3	95,930	0,1569	[84,0 96,0 108,0]	[13,4 15,2 17,2]	[0,58 0,78 0,81]
4	134,9351	0,1561	[120,0 132,0 144,0]	[19,1 21,1 22,9]	[0,81 0,79 0,58]
5	168,8520	0,1579	[156,0 168,0 180,0]	[24,9 26,8 28,7]	[0,81 0,78 0,58]
6	207,7028	0,1281	[192,0 204,0 216,0]	[30,6 32,2 33,7]	[0,58 0,78 0,81]
7	241,4304	0,1235	[228,0 240,0 252,0]	[35,2 36,7 38,2]	[0,81 0,78 0,58]
8	280,2351	0,1236	[264,0 276,0 288,0]	[39,7 41,2 42,7]	[0,58 0,78 0,81]

<b>Tiro Reverso</b>					
Segmento	$\rho$	$\alpha$	x (km)	t (s)	Vetor peso
1	50,2996	0,1603	[24,0 36,0 48,0 60,0]	[3,7 5,6 7,6 9,5]	[0,78 0,50 0,75 0,79]
2	83,7823	0,1593	[72,0 84,0 96,0]	[11,4 13,3 15,3]	[0,81 0,79 0,58]
3	122,7828	0,1596	[108,0 120,0 132,0]	[17,2 19,1 21,1]	[0,58 0,79 0,81]
4	156,6998	0,1576	[144,0 156,0 168,0]	[23,0 24,8 26,8]	[0,81 0,79 0,58]
5	195,6624	0,1459	[180,0 192,0 204,0]	[28,7 30,6 32,2]	[0,58 0,79 0,81]
6	229,3228	0,1210	[216,0 228,0 240,0]	[33,8 35,2 36,7]	[0,81 0,79 0,58]
7	268,1426	0,1234	[252,0 264,0 276,0]	[38,2 39,7 41,2]	[0,58 0,79 0,81]

Note na Figura 5.5 que os dados sintéticos apresentam o número mínimo de pontos estabelecido para formação dos segmentos de reta. Isso ocorre devido a baixa dispersão temporal e espacial dos pontos presentes nos dados sintéticos. Os valores dos parâmetros de reta calculados pelo SMF, os pesos e os pontos que compõem cada segmento extraído estão na Tabela 5.3.

A classificação em grupos de onda Pg e Pn é feita pela investigação do coeficiente angular de cada segmento extraído pelo SMF. O limiar estabelecido para que um segmento seja considerado como chegada da fase Pn baseou-se em [Giese 1976], definido como qualquer segmento que apresentar uma inclinação angular maior que 0,1333 s/km, o que corresponde a 7,6 km/s de velocidade de propagação. A Tabela 5.4 mostra os parâmetros fornecidos pela metodologia de classificação.

O resultado final da classificação em Pg e Pn é mostrado graficamente na Figura 5.6. Verifica-se que a incerteza na determinação dos segmentos é maior nas fases Pn. Fatores como variação de velocidade de propagação na crosta e maior tempo de percurso da fase Pg corroboram para o aumento do erro. Apesar do erro presentes nas fases Pg para ambos os tiros, o principal objetivo é a classificação do grupo Pn, para servir como parâmetro auxiliar na detecção da PmP e fornecer estimativas consistente acerca da velocidade de propagação no manto  $v_m$ .

Tabela 5.4: Grupos de fase Pg e Pn classificados pela investigação do coeficiente angular dos segmentos resultantes do SMF. O erro dos parâmetros polares  $(\rho, \alpha)^T$  foi determinado por propagação dos pesos exercidos em cada ponto para formação do segmento.

<b>Tiro Direto</b>				
Grupo de Fase	$\rho$	$\alpha$	Distância (km)	Tempo (s)
			$x_{inicio}, x_{fim}, (\Delta x)$	$t_{inicio}, t_{fim}, (\Delta t)$
Pg	103.2792	0.1592	36, 180, (144)	5.58, 28.7, (23.12)
Pn	242.6982	0.1244	192, 288, (96)	30.62, 42.68, (12.6)

<b>Tiro Reverso</b>				
Grupo de Fase	$\rho$	$\alpha$	Distância (km)	Tempo (s)
			$x_{inicio}, x_{fim}, (\Delta x)$	$t_{inicio}, t_{fim}, (\Delta t)$
Pg	109.3536	0.1585	24, 204, (180)	3.68, 26.80, (23.12)
Pn	248.7395	0.1232	216, 276, (60)	33.78, 41.18, (7.40)

### 5.2.3 Detecção da PmP

A detecção da PmP envolve a utilização das informações adquiridas na classificação da Pn a partir do sismograma composto. A extrapolação do segmento define pontos iniciais em cada traço para busca do provável tempo de ocorrência do grupo de ondas da PmP. Por ser uma fase interna do sismograma, o tempo de chegada exato é mais difícil de ser definido devido interferência de fases anteriores.

A extrapolação da Pn foi feita por estimação dos parâmetros dos segmento de reta  $t = ax + b$  que descreve o grupo de fase. Por meio da estimação para minimização ponderada do erro médio quadrático, os parâmetros da reta Pn foram calculados. A partir de observações dos levantamentos de refração para estudo da crosta continental [Giese 1976], o intervalo de traços escolhidos para detecção estão localizados entre 70 e 120 km de distância da fonte. Isso deve-se à característica do pico de amplitude no ponto crítico. A Tabela 5.5 mostra os parâmetros estimados e os tempos iniciais de detecção nos traços para os perfis direto e reverso.

Tabela 5.5: Tempos iniciais para detecção da PmP em traços localizados próximos à zona do ponto crítico. Os tempos foram determinados por meio da extrapolação do segmento de reta correspondente à fase Pn.

<b>Tiros Direto</b>				
<i>Offset</i> (km)	72,0	84,0	96,0	108,0
Tempo início (s)	15,59	17,40	18,88	20,35

<b>Tiro Reverso</b>				
<i>Offset</i> (km)	72,0	84,0	96,0	108,0
Tempo início (s)	15,59	17,40	18,80	20,30

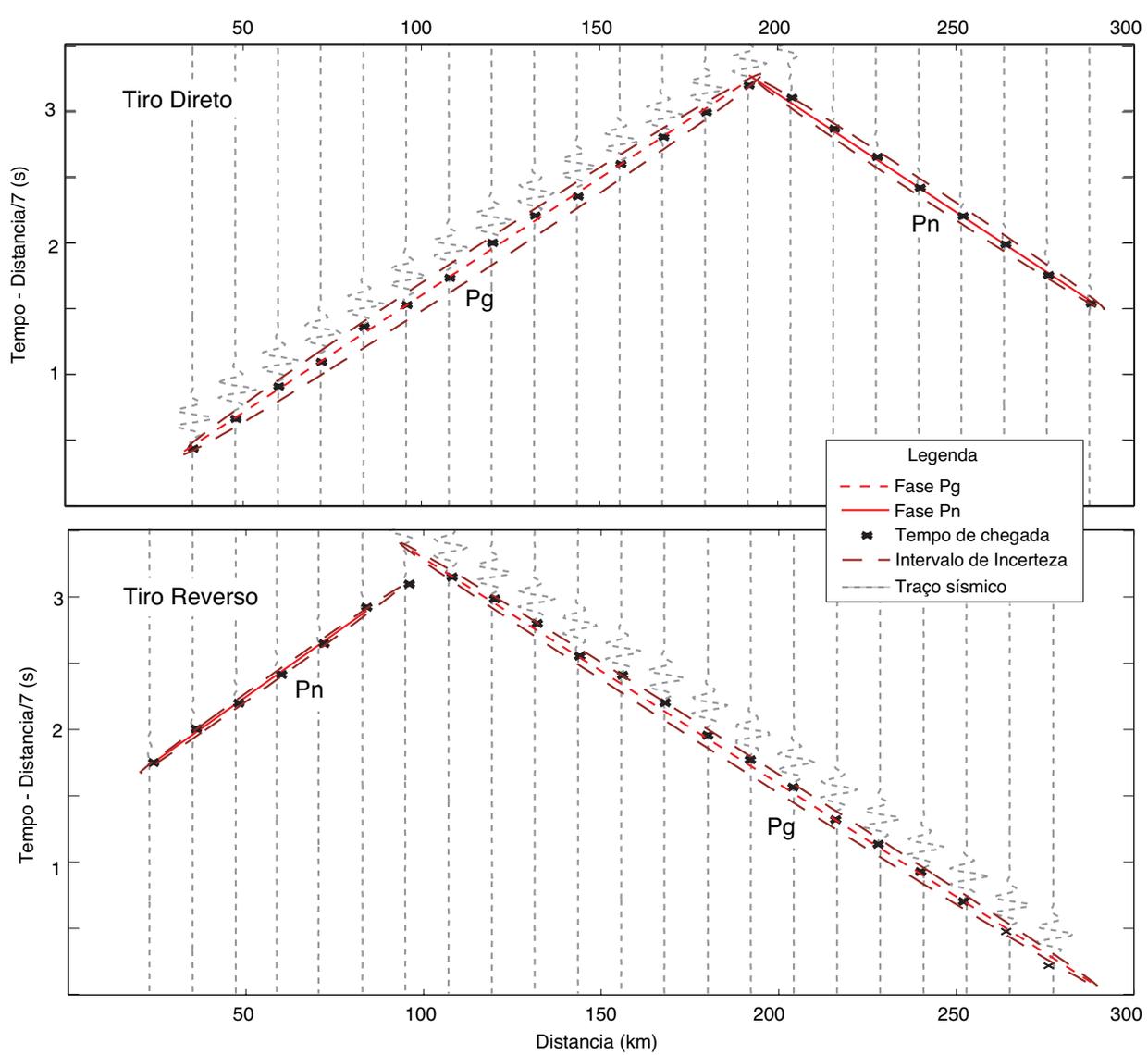


Figura 5.6: Resultado da classificação dos segmentos SMF em grupos de fase Pg e Pn. As linhas tracejadas em vermelho representam as fases Pg. A chegada da Pn é representada pela linha sólida em vermelho. As elipses ao redor dos segmentos representam os intervalos de confiança calculado por meio da propagação de incertezas. As linhas tracejadas em cinza representam o traço sísmico, mostrado com redução de 7 km/s.

Todos os métodos de detecção apresentados na seção 4.3 do capítulo 4, foram utilizados para detecção do provável tempo de chegada da PmP. Dentro do intervalo estabelecido, quatro traços foram utilizados na detecção da fase. A baixa quantidade utilizada deve-se ao reduzido número de traços sintéticos gerados na seção sísmica. A Tabela 5.6 mostra os tempos detectados para as técnicas de busca por máxima amplitude, máxima energia, *skewness* e *kurtosis*. Os valores em **negrito** indicam o tempo detectado que possui o menor resíduo em relação ao tempo de chegada real.

Dentre as técnicas empregadas, a busca pelo valor máximo de amplitude detectou a chegada do grupo de onda da PmP nos tiros direto e reverso sem resíduo em relação à chegada real.

Tabela 5.6: Resultado da detecção da PmP para as técnicas de Máxima Amplitude ( $t_{ma}$ ), Máxima Energia ( $t_{me}$ ), *Skewness* ( $t_{sk}$ ) e *Kurtosis* ( $t_{kt}$ ). Nos dois perfis, os valores em negrito representam o tempo detectado com menor resíduo em comparação com o tempo de chegada real ( $t_r$ ).

Tiro Direto					
		Método			
Offset (km)	$t_r$ (s)	$t_{ma}$ (s)	$t_{me}$ (s)	$t_{sk}(s)$	$t_{kt}$ (s)
72	16, 10	<b>16, 10</b>	16, 06	16, 18	16, 08
84	17, 46	<b>17, 46</b>	17, 46	17, 50	17, 44
96	18, 90	<b>18, 90</b>	18, 90	18, 94	18, 88
108	28, 38	<b>20, 38</b>	20, 38	20, 46	20, 38

Tiro Reverso					
		Método			
Offset (km)	$t_r$ (s)	$t_{ma}$ (s)	$t_{me}$ (s)	$t_{sk}(s)$	$t_{kt}$ (s)
72	16, 10	<b>16, 10</b>	16, 06	16, 18	16, 08
84	17, 46	<b>17, 46</b>	17, 46	17, 50	17, 44
96	18, 96	<b>18, 96</b>	18, 92	18, 94	18, 88
108	20, 44	<b>20, 44</b>	20, 42	20, 46	20, 42

Essa característica era esperada para os dados sintéticos, onde são geradas somente as fases de interesse, sem a interferência de qualquer tipo de ruído. Para este caso, o ruído branco acrescido ao sismograma não influenciou a detecção pela máxima amplitude devido a alta relação sinal/ruído dos traços. Por apresentar melhor resultado na determinação da PmP, somente os resultados obtidos pela técnica de máxima amplitude serão utilizados para estimação dos parâmetros da crosta continental.

O desempenho inferior das outras técnicas é atribuído ao método de busca por janelas nos dados sintéticos. Esse tipo de inferência indireta gera resíduos em comparação ao tempo de chegada real. Apesar de realçar características da PmP não observadas na leitura do traço, a proeminência da PmP nos dados sintéticos torna a busca direta mais precisa.

#### 5.2.4 Estimação da velocidade de propagação no manto superior - $v_m$

A velocidade de propagação da onda compressional  $v_m$  no manto superior, é determinada pelo inverso do coeficiente angular do segmento de reta classificado como Pn. O cálculo é feito pela equação 4.11 e a incerteza é determinada por meio de propagação não-linear dos erros. A Tabela 5.7 mostra a velocidade de propagação estimada e o erro calculado para os tiros direto e reverso.

Nota-se que o pequeno intervalo de incerteza é caracterizado pela baixa dispersão dos pontos na região da Pn para os dados sintéticos, e da constatação que a variação de velocidade na região do manto superior é baixa.

Tabela 5.7: Velocidade de propagação do manto superior  $\hat{v}_m$  estimada a partir do inverso do coeficiente angular do segmento de reta da refração na Moho. A tabela mostra a velocidade estimada em comparação com a velocidade real estipulada para o meio para ambos os perfis.

<i>Perfil</i>	$v_m$ real (km/s)	$\hat{v}_m$ (km/s)
Direto	8,0	$8,000 \pm 0,079$
Reverso	8,0	$8,077 \pm 0,063$

### 5.2.5 Estimação da velocidade e espessura média da crosta continental - $\Theta = (v_c, h_c)^T$

Os tempos de chegada da PmP, detectados pela busca pela máxima amplitude, foram utilizados para estimação da velocidade média de propagação  $v_c$  e espessura média  $h_c$  da crosta continental. O primeiro passo consiste na obtenção do parâmetro  $\hat{\Theta} = (\hat{v}_c, \hat{h}_c)^T$  através da construção da grade de valores determinados considerando do ambiente geotectônico estudado. Os parâmetros  $\hat{\Theta}_{mv}$  são determinados pelo valor máximo da função de densidade de probabilidade  $p(t_{PmP}|\Theta)$ . Para reduzir o efeito causado pela discretização da grade de valores, utiliza-se o algoritmo SIR (*Sampling Importance Resampling*) para gerar a função de densidade  $p(\Theta|t_{PmP})$ . Os parâmetros  $\hat{v}_c$  e  $\hat{h}_c$  são determinados por inferência na população de amostras geradas em  $p(\Theta|t_{PmP})$ .

Como os dados sintéticos não possuem um ambiente geotectônico definido, a grade de valores para velocidade e espessura média da crosta continental foram gerados com base na média global inferida por [Christensen e Mooney 1995]. De acordo com a tabela 1.1, os valores observados determinados para  $v_c$  foram entre 6,24 – 6,76 km/s, e para  $h_c$  entre 34,8 – 47,2 km. A grade foi gerada com 200 pontos para cada parâmetro. A variância do erro de medição utilizada foi de  $\sigma_w^2 = 0,05 \text{ s}^2$  em ambos os perfis. Os resultados obtidos para a função de verossimilhança nos tiros direto e reverso estão na Figura 5.7.

A estimação do parâmetro  $\hat{\Theta}_{mv}$  foi feita a partir da inferência do valor máximo na função de verossimilhança. O intervalo de incerteza foi determinado a partir da análise da densidade marginal de  $v_c$  e  $h_c$ , juntamente com o coeficiente de correlação determinado entre as duas curvas de densidade marginal. A forma elipsoidal da função mostra que ambas as densidades marginais são Gaussianas. Os valores estimados para o máximo da verossimilhança são mostrados na Tabela 5.8. As estimativas foram utilizadas como parâmetro de entrada para geração de amostras da função de densidade  $p(\Theta|t_{PmP})$  pelo algoritmo SIR. A Figura 5.8 mostra a densidade de probabilidade gerada para população de 10.000 amostras para os perfis direto e reverso. A elipse em vermelho representa o intervalo de confiança 3-sigma da densidade conjunta.

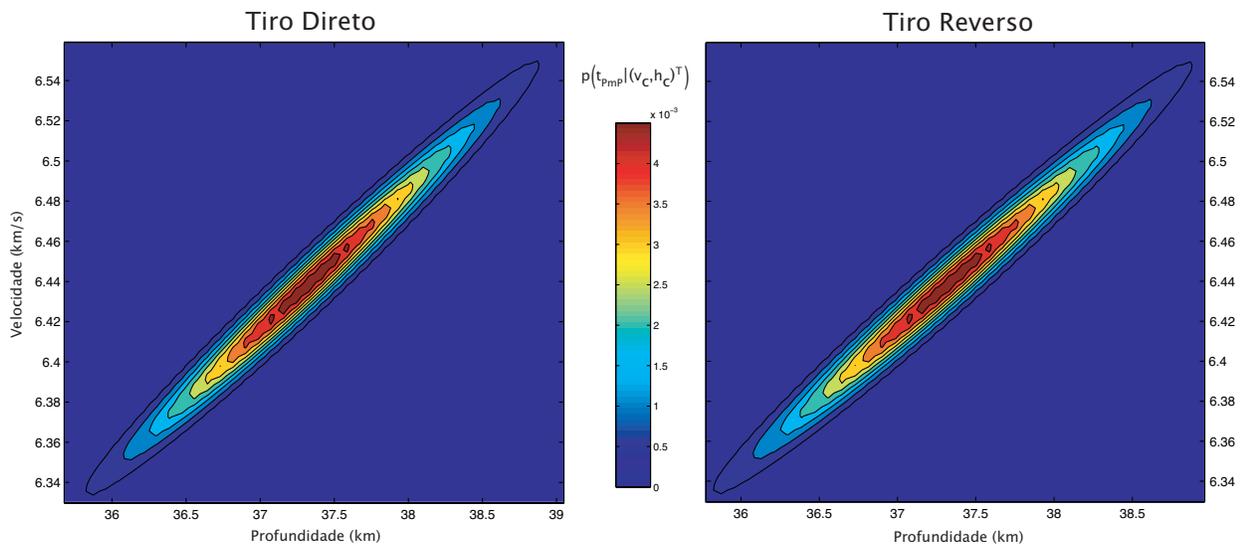


Figura 5.7: Resultado da função de verossimilhança  $p(t_{PmP}|\Theta)$  baseado na grade de busca para os tiros direto e reverso. A grade gerada compreende os valores globais levantados por [Christensen e Mooney 1995] para velocidades e espessuras média da crosta. Como o modelo sintético gerado é uniforme, as funções de verossimilhança são idênticas. Para ambos os casos  $\sigma_w^2 = 0,05 \text{ s}^2$

A Tabela 5.8 mostra o resultado final para estimação da velocidade  $\hat{v}_c$  e espessura  $\hat{h}_c$  média da crosta continental. Os parâmetros estimados pelo método SIR foram inferidos a partir da população de amostras geradas da função  $p(\Theta|t_{PmP})$ . Esses parâmetros servirão como base para construção do modelo de velocidades que busca descrever a estrutura da crosta.

### 5.2.6 Construção do modelo de velocidades

A Tabela 5.9 mostra o resultado final das estimativas obtidas da velocidade de propagação e espessura média da crosta, e velocidade de propagação no manto superior para os tiros direto e reverso. Em ambos os perfis, a diferença entre as estimativas obtidas e os parâmetros definidos na geração dos dados sintéticos foi de aproximadamente 0,04 km/s para velocidade média da crosta, 0,320 km na espessura média crustal, e 0,07 km/s para velocidade de propagação no manto.

Tabela 5.8: Resultado da estimação dos parâmetros de velocidade e espessura média da crosta. As estimativas iniciais foram obtidas pelo máximo da verossimilhança (MV). O ajuste do resultado da MV foi feito pelo método *Sampling Importance Resampling* (SIR).

<i>Perfil</i>	Método	$\hat{v}_c$ (km/s)	$\hat{h}_c$ (km)
Direto	MV	$6,439 \pm 0,074$	$37,329 \pm 1,199$
	SIR	$6,439 \pm 0,076$	$37,323 \pm 1,222$
Reverso	MV	$6,439 \pm 0,074$	$37,329 \pm 1,199$
	SIR	$6,440 \pm 0,076$	$37,325 \pm 1,218$

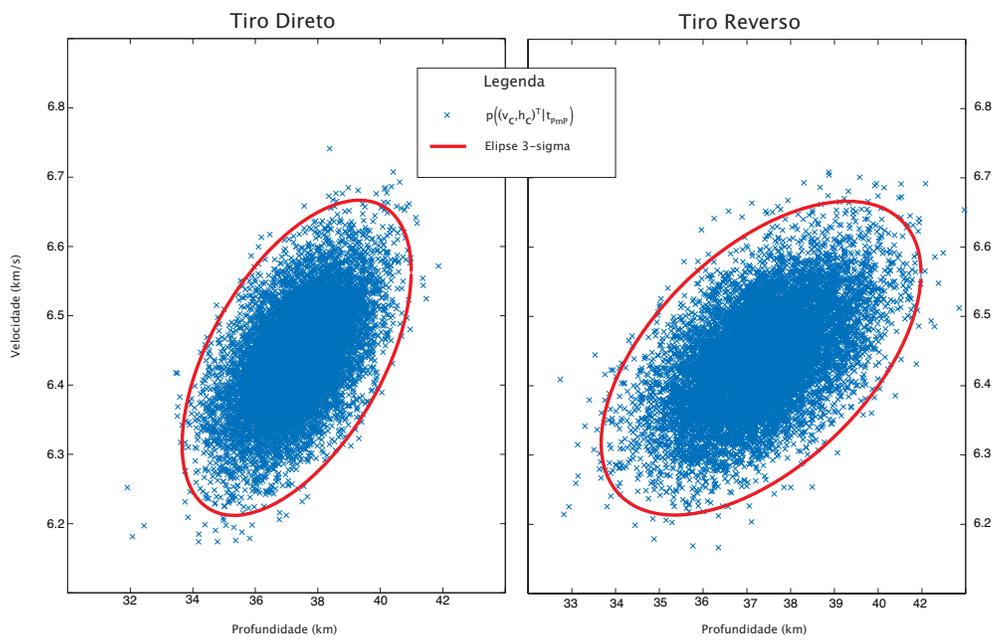


Figura 5.8: Função de densidade de probabilidade conjunta  $p(\Theta|t_{PmP})$  gerada pelo método SIR. Foram geradas 10.000 amostras para os tiros direto e reverso. A elipse de incerteza 3-sigma está em vermelho e abrange 98,89 % das amostras geradas.

Tabela 5.9: Resultado final da estimação da velocidade de propagação e espessura média crustal  $v_c$  e  $h_c$ , e velocidade de propagação no manto superior  $v_m$ . Todos os valores estimados são comparados com os parâmetros definidos para construção do sismograma sintético.

<i>Perfil</i>	$\hat{v}_c$ (km/s)	$\hat{h}_c$ (km)	$v_m$ (km/s)
<b>Real</b>	<b>6,45</b>	<b>37,0</b>	<b>8,00</b>
Direto	$6,439 \pm 0,076$	$37,323 \pm 1,222$	$8,000 \pm 0,079$
Reverso	$6,440 \pm 0,076$	$37,325 \pm 1,218$	$8,077 \pm 0,063$

O intervalo de incerteza obtido para cada parâmetro abrange as propriedades reais e também é mostrado na Tabela 5.9.

A baixa dispersão verificada nos pontos detectados para os grupos de fase Pn resultaram na baixa incerteza de estimação da velocidade de propagação no manto  $v_m$ . A propagação foi realizada através dos processos de extração, classificação e estimação do ângulo de inclinação do segmento da Pn. No caso do tiro direto, a estimativa encontrada foi idêntica ao valor real determinado com três casas decimais de precisão. A valor de  $v_m$  no tiro reverso apresentou um desvio de 0,07 km/s do valor real, devido à extração SMF, que considerou um segmento no ponto de mudança entre as fases Pg e Pn (Figura 5.5B).

A diferença observada entre os valores reais e os parâmetros estimados para a velocidade e espessura média da crosta continental, deve-se à leitura do tempo da máxima amplitude da fase PmP. Ao contrário da primeira quebra, o interesse está na detecção do tempo de ocorrência do grupo de onda da PmP. Nos dados sintéticos, observa-se um atraso entre a chegada da PmP e o

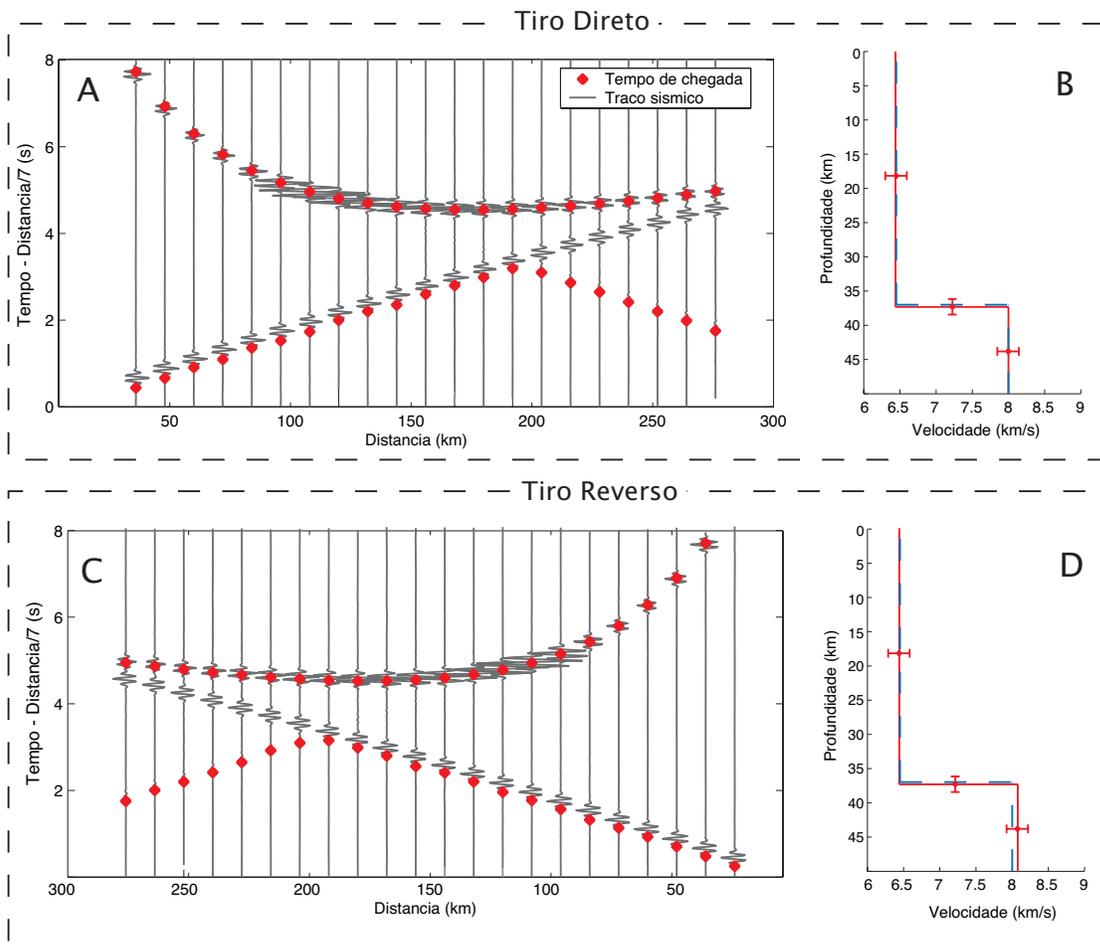


Figura 5.9: Resultado final do algoritmo de detecção das fases Pg, Pn e PmP e estimação dos parâmetros médio da crosta continental para uma base sintética de registros sísmicos. As detecções de fase são representadas graficamente pelos pontos em vermelho (A) e (C). Os modelos de velocidade real (azul) e estimado (vermelho) são mostrados em (B) e (D) para os perfis direto e reverso.

ponto de máxima amplitude, adotado como parâmetro de detecção. Esse atraso acarreta diferença entre os valores reais e obtidos pelo processo de detecção e estimação de  $v_c$  e  $h_c$ . A incerteza estimada, no entanto, contempla os valores reais determinados para o modelo em seu intervalo.

Para o perfil estipulado na Figura 1.8, os processos empregados neste trabalho foram capazes de recuperar as informações de entrada do modelo que gerou os dados sintéticos. As incertezas associadas em todos os processos foram calculadas levando-se em conta os processos utilizados na estimação dos parâmetros que descrevem a estrutura média da crosta. A Figura 5.9 mostra o resultado final do processo de estimação para os tiros direto e reverso. São mostrados os tempos de chegada identificados para os grupos de fase Pg, Pn e PmP, e a construção do provável modelo médio de velocidades.

### 5.3 Registros de refração sísmica da Província Tocantins

Registros reais de refração sísmica profunda foram adquiridos em estudos da crosta e do manto superior realizados no Brasil central [Soares et al. 2006]. Levantamentos de refração sísmica profunda buscaram caracterizar a estruturação crustal da Província Tocantins por meio da construção de modelos de velocidade em duas dimensões.

A Província Tocantins é um orógeno <sup>1</sup> Neoproterozóico (900Ma - 500Ma), formado pela convergência dos crátons<sup>2</sup> Amazônico, São Francisco e Paranapanema. O processo de colisão resultou na junção de terrenos com idade e história geológica distintas. A Província Tocantins é formada pelas faixas dobradas Araguaia e Paraguai, na borda da margem leste do Cráton Amazônico, e Faixa Brasília na margem oeste do Cráton São Francisco. A Faixa Brasília é subdividida de leste para oeste em 3 diferentes terrenos: Arco Magmático do Goiás, composto por um mosaico de rochas metaplutônicas entre pequenas faixas de seqüência de rochas vulcânico-sedimentar; Maciço do Goiás, com terrenos Arqueanos Paleoproterozóicas, e zona externa da faixa, com embasamento Paleoproterozóico. Na região centro-sul da província, fora da área do levantamento, encontra-se o Complexo Anápolis-Iguaçu, composto por rochas de núcleo magmático de alto grau. A Figura 5.10 mostra o mapa geológico da Província Tocantins com a separação das principais unidades geológicas.

Os levantamentos de refração sísmica profunda de Porangatu e Cavalcante foram realizados no norte do estado de Goiás. A seção formada atravessa as principais unidades geológicas da Província Tocantins, com extensão total de 530 km. Localizada na porção oeste da Província Tocantins, a linha de Porangatu estendeu-se do município de São Miguel do Araguaia até 50 km a leste de Minaçu. A linha de Cavalcante começou em Minaçu, terminando 100 km a leste de Posse, em uma área não habitada. Cada linha tem extensão média de 300 km sobrepostas de 50 km (Figuras 5.10 e 5.11).

Em cada linha foram instalados 120 registradores, espaçados de 2,5 km. Fontes sísmicas, geradas a partir de explosões químicas, foram instaladas a cada 50 km, totalizando sete tiros em cada linha. As cargas explosivas variaram de 500 kg para o tiro central, a 1000 kg em tiros nos extremos das linhas. Em ambos os levantamentos, os tiros 1 e 7 foram escolhidos como perfis direto e reverso por possuírem maior extensão de registro em um único sentido. Essa configuração possibilita visualizar mais traços que fornecem informações sobre a chegada da fase Pn. O período de aquisição é o mesmo em todos os pontos em  $T_{acq} = 0,006$  segundos.

A avaliação dos resultados dos tempos de chegada fornecidos pelos métodos de detecção de fase são comparados com os tempos de chegada obtidos por um analista de dados. A validação da estimação dos parâmetros médios da crosta continental é feita a partir da comparação com os valores estipulados pela modelagem 1D realizado por [Soares 2005]. A Tabela 5.10 mostra os valores determinados para os tiros considerados no trabalho.

---

<sup>1</sup>Província tectônica onde se desenrolam os processos geológicos relacionados ao confronto de placas litosféricas. Esses processos dão origem às grandes cadeias montanhosas da Terra. Fonte: [IG-UnB].

<sup>2</sup>Porção interior mais estável da placa continental. Em termos de placas tectônicas, os crátons representam a parte da placa continental que não foi afetada pelas atividades de borda de placa. Fonte: [IG-UnB]

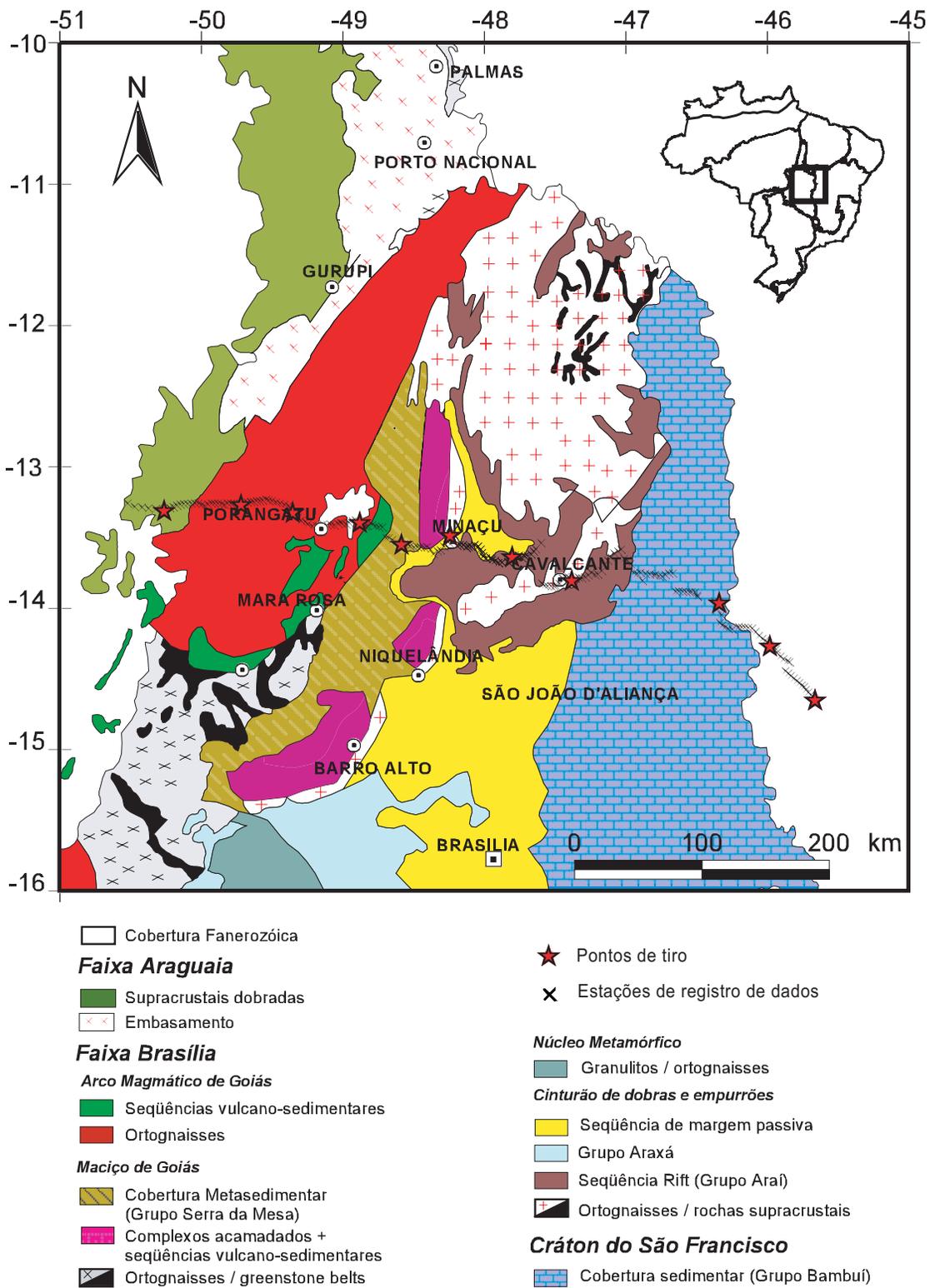


Figura 5.10: Mapa geológico da Província Tocantins. No sentido leste-oeste, são mostrados o Cráton do São Francisco, a Faixa Brasília (dividida em zona externa, Maçiço do Goiás e Arco Magmático de Goiás), e a Faixa Araguaia. Os levantamentos de refração sísmica profunda de Cavalcante e Porangatu são mostrados no mapa. Os pontos em cruz (X) representam as estações de registro de dados e as estrelas ilustram as posições dos tiros efetuados.

Os resultados obtidos estão assim organizados: a seção 5.3.2 trata dos resultados estimados no levantamento de Cavalcante, enquanto os resultados obtidos na linha de Porangatu são discutidos na seção 5.3.1. Para ambos os casos, somente os resultados finais são apresentados e comparados com valores de referência. Os resultados obtidos por todos os processos envolvidos na construção do modelo de velocidades estão disponíveis no Anexo I.

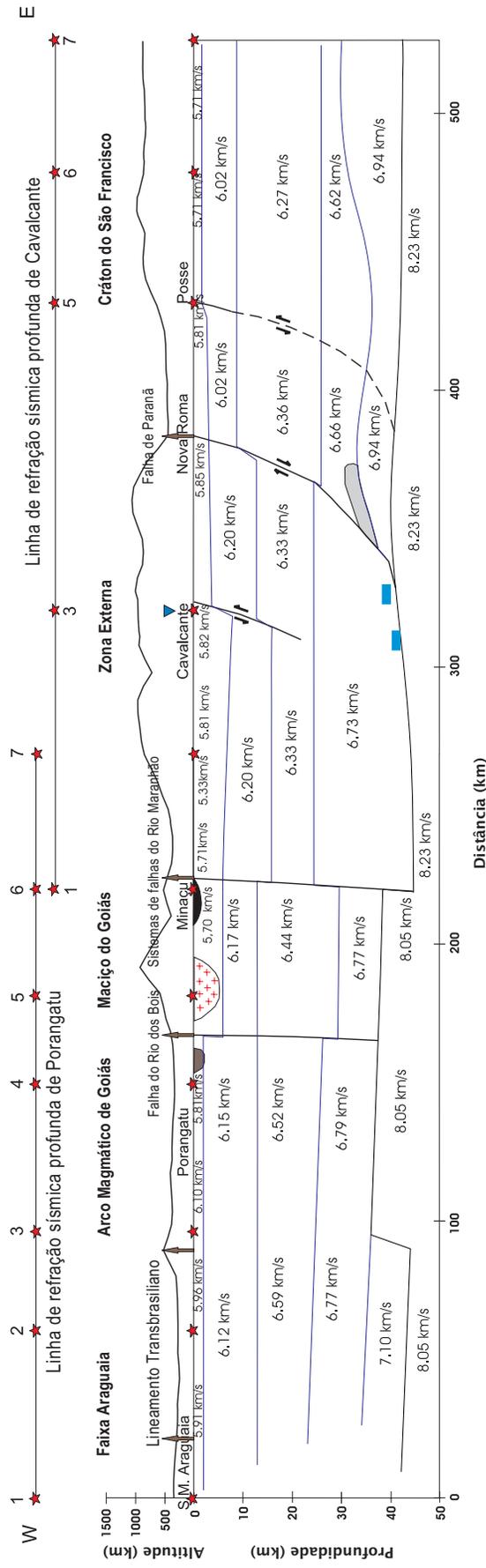


Figura 5.11: Modelo em duas dimensões da crosta e do manto superior obtidos por modelagem direta de traçado de raio a partir dos levantamentos de refração sísmica profunda de Cavalcante e Porangatu e da função do receptor. O perfil topográfico é mostrado em conjunto com o modelo. As subdivisões sísmicas foram fundamentadas pelo comportamento da Moho, arquitetura da crosta, variações na velocidade média de propagação da onda P na crosta e sua relação com as ondas S ( $V_p / V_s$ ). A descontinuidade na região de Minaçu foi identificada por mudanças na velocidade do manto superior, na arquitetura da crosta, na profundidade da Moho, e no comportamento do perfil topográfico. As anomalias locais na crosta superior são identificadas de oeste para leste como corpo anortsico (cinza), granito Serra Dourada (rea em cruz), e o complexo máfico-ultramáfico canadado de Cana Brava (negro). Os triângulos invertidos indicam a posição do arranjo sismogrfico instalado em Cavalcante e as barras sobre ele mostram a profundidade da Moho obtida por função do receptor. Fonte: [Soares et al. 2006].

Tabela 5.10: Parâmetros médios da estrutura da crosta continental obtidos por [Soares et al. 2006] para os tiros 1 e 7 nos levantamentos de Porangatu e Cavalcante. A velocidade média da crosta é representada por  $v_c$ , a espessura média por  $h_c$  e  $v_m$  é a velocidade do manto.

<i>Perfil</i>	<b>Cavalcante</b>			<b>Porangatu</b>		
	$v_c$ (km/s)	$h_c$ (km)	$v_m$ (km/s)	$v_c$ (km/s)	$h_c$ (km)	$v_m$ (km/s)
<b>Direto</b> (Tiro 1)	6,42	43,0	8,28	6,5	37,5	7,80
<b>Reverso</b> (Tiro 7)	6,42	42,0	8,28	6,46	39	8,20

### 5.3.1 Linha Sísmica de Porangatu

No levantamento realizado na linha sísmica de Porangatu, 50 traços do tiro direto 64 do tiro reverso foram descartados dentre os 120 sensores instalados. As razões de descarte são semelhantes às da linha de Cavalcante, tal como mal funcionamento dos equipamentos durante o levantamento ou elevado nível de ruído de fundo.

O pré-processamento dos traços consistiu de um filtro passa-banda, do tipo *Butterworth* de terceira ordem e frequência de corte entre 2 e 10 Hz. O filtro foi implementado de modo a não apresentar atraso em fase no registro. As Figuras 5.12A e 5.13A mostram os registros brutos de Porangatu. Apesar da alta relação sinal/ruído nos dados brutos, optou-se por utilizar filtros em frequência para diminuir os efeitos causados por impulsos nos traços. As Figuras 5.12B e 5.13B mostram os traços filtrados utilizados como entrada no processo de identificação das primeiras chegadas.

A partir dos traços filtrados observa-se que as primeiras chegadas são claras e bem definidas nos registros em ambos os perfis. A boa qualidade dos registros permite apontar regiões de anomalia local nos dois tiros. As anomalias são observadas na região da seção localizada entre 100 e 200 km do ponto de tiro para o perfil direto, e 50 e 150 km para o reverso. Esse tipo de anomalia é verificada pelo desvio no alinhamento do tempo de chegada das primeiras quebras na seção sísmica, resultante da variação de velocidade de propagação da fase (Figuras 5.12B e 5.13) [Soares et al. 2006].

A redução de velocidade em 7 km/s aplicada nas seções sísmicas mostra que a região de quebra do alinhamento das primeiras quebras (transição entre Pg e Pn) ocorre a 202 km de distância da fonte no tiro direto e 175 km do tiro reverso. As chegadas da reflexão da Moho aparecem no registro entre 180 e 200 km no perfil direto, e entre 100 e 150 km no perfil reverso.

A região de refração crítica no tiro direto é caracterizada pela zona de transição entre Faixa Araguaia e o Arco Magmático de Goiás. Essa zona é caracterizada por [Soares et al. 2006] como uma descontinuidade em degrau de profundidade da Moho, que varia de 44 km na Faixa Araguaia para 36 km no Arco Magmático de Goiás. O degrau na descontinuidade de Moho é explicado pela superposição de duas camadas crustais inferiores, a superior com velocidade média  $v_c$  de 6,8 km/s, e a mais profunda com  $v_c$  média de 7,1 km/s. Essa característica pode ser visualizada na seção sísmica como uma diminuição na velocidade aparente da Pn do tiro reverso e no deslocamento da chegada da PmP, aparecendo duas chegadas de reflexão proeminentes.

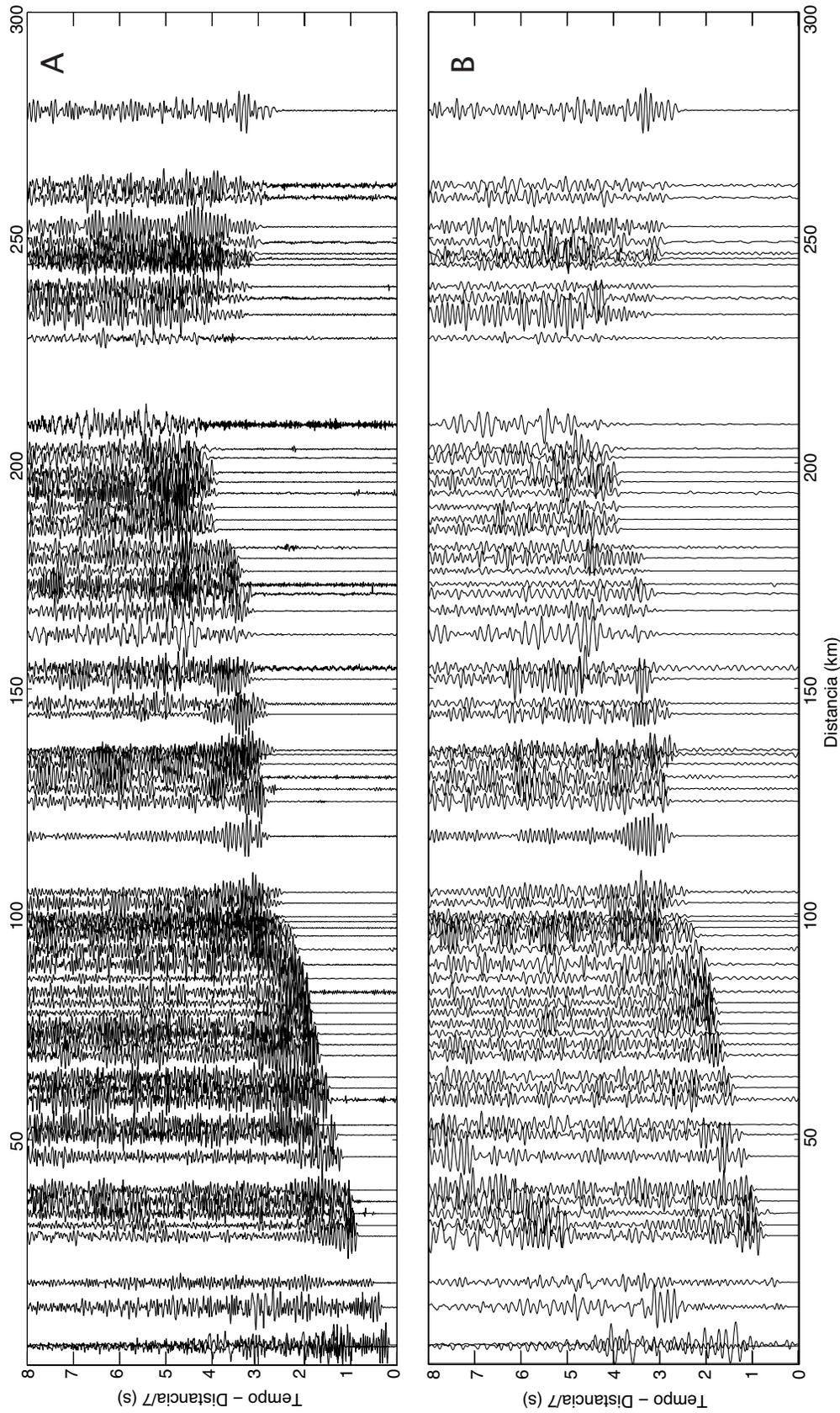


Figura 5.12: Sismograma composto do tiro direto obtido a partir do levantamento de refração sísmica profunda realizado em Porangatu. Para restringir o espectro de frequências e eliminar informações que possam atrapalhar o processo de estimação, os traços na forma bruta (A) foram filtrados por um filtro passa-banda (B) com frequência de corte entre 2 e 10 Hz. O período de amostragem dos registros é de  $T_{acq} = 0,007$  segundos, e o sismograma foi reduzido em 7 km/s.

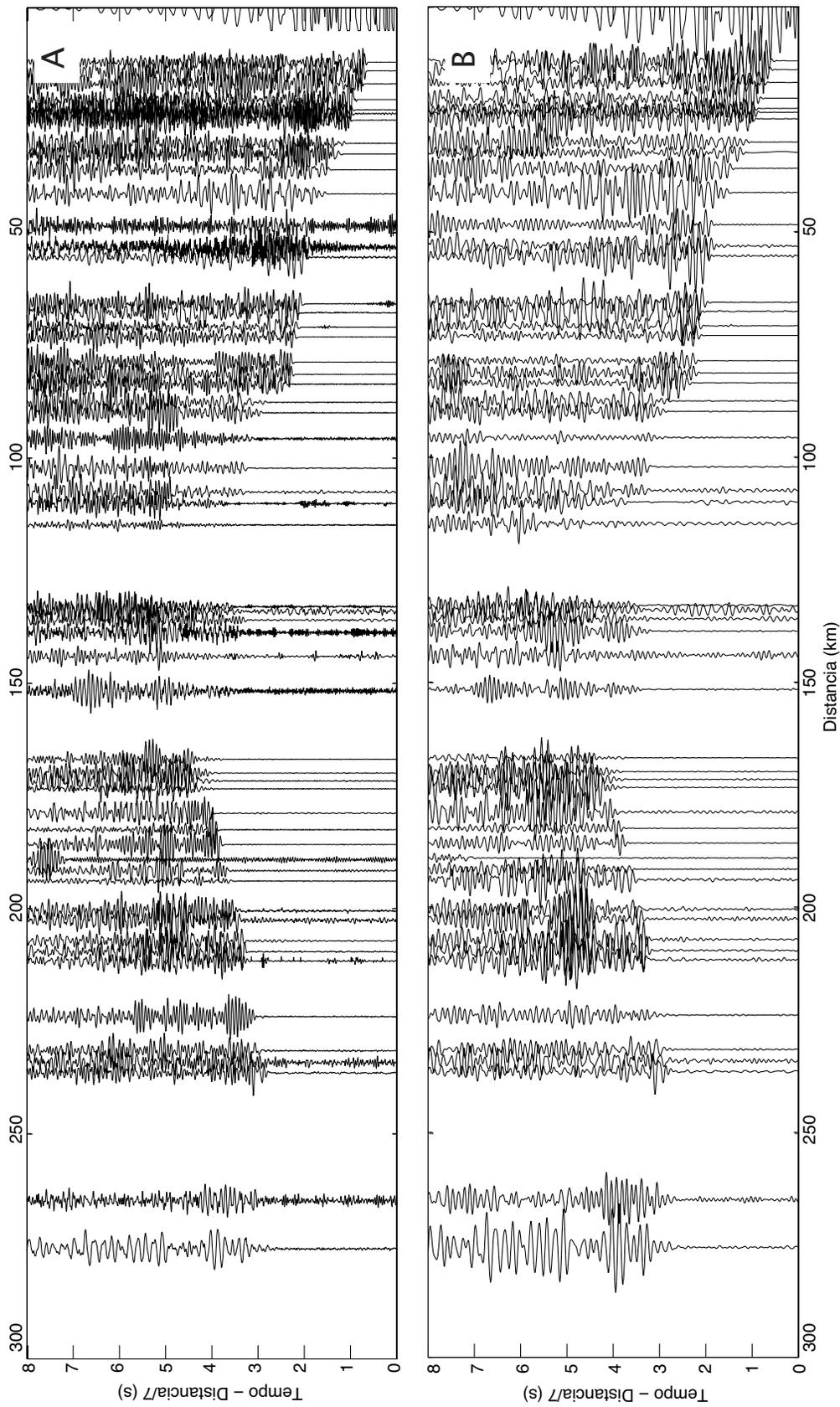


Figura 5.13: Sismograma composto do tiro reverso obtido a partir do levantamento de refração sísmica profunda realizado em Porangatu. Para restringir o espectro de frequências e eliminar informações que possam atrapalhar o processo de estimação, os traços na forma bruta (A) foram filtrados por um filtro passa-banda (B) com frequência de corte entre 2 e 10 Hz. O período de amostragem dos registros é de  $T_{acq} = 0,007$  segundos, e o sismograma foi reduzido em 7 km/s.

### 5.3.1.1 Perfil direto

Os parâmetros de incerteza estipulados foram  $q_{ii} = 10^{-6}$  para o modelo de evolução, e  $R = 10^{-7}$  para a incerteza de medição, em um modelo AR de ordem 3. Ao todo, 3 registros apresentaram atrasos na determinação maiores que 0.3 segundos. Esses traços caracterizam-se pela baixa relação sinal/ruído, fazendo com que o método de estimação aponte a ocorrência da fase (identificação tardia). Em cerca de 70% dos registros, o tempo de identificação entre o algoritmo e o analista não apresentou diferença significativa, com atrasos menores que 0,035 segundos ou cinco amostras. Cerca de 90% das chegadas identificadas apresentaram uma diferença de até 0.1 segundos (aproximadamente 15 amostras a  $T_{acq} = 0,007s$  (Anexo I).

A Figura 5.14 mostra que, de acordo com o modelo proposto por [Soares et al. 2006], a região da seção localizada entre 170 e 190 km é caracterizada pelas primeiras quebras de refração propagadas na região de fronteira entre a Faixa Araguaia e o Arco Magmático de Goiás. Na tentativa de observar a região de transição, o algoritmo SMF trabalhou com o parâmetro de dispersão de  $\delta_{max} = 15$  nos pontos de primeira quebra.

Baseado nos resultados apresentados para região da Pn, a detecção da PmP deu-se pelo método de busca por *kurtosis*. A variância do erro de detecção foi fixada em 0.1 segundos. A busca foi feita nos traços localizados entre 150 e 200 km de distância do tiro. A partir dos pontos detectados, o estimador MV/SIR determinou a velocidade de propagação e estrutura média da crosta como  $\hat{v}_c = 6,427 \pm 0,130$  km/s e  $\hat{h}_c = 37,36 \pm 4,53$  km (Tabela 5.11). A grade de busca de máximo da verossimilhança (MV) foi construída com base em ambientes de Arco Magmático, divididas em 100 valores para velocidade entre 6,19 e 6,49 km/s, e 100 valores para espessura entre 29,1 e 48,4 km. As estimativas de MV foram suavizadas a partir do método SIR para 10.000 amostras.

A boa qualidade apresentada nos dados mostra que o resíduo médio entre o tempo de chegada real e o determinado pelo algoritmo de detecção diminuiu em comparação com os dados utilizados no levantamento de Cavalcante. De maneira similar, para eventos mais próximos à fonte (caráter impulsivo) o algoritmo apontou a chegada de fase antes do analista. À medida que os traços foram se afastando, os tempos foram após a marcação do analista.

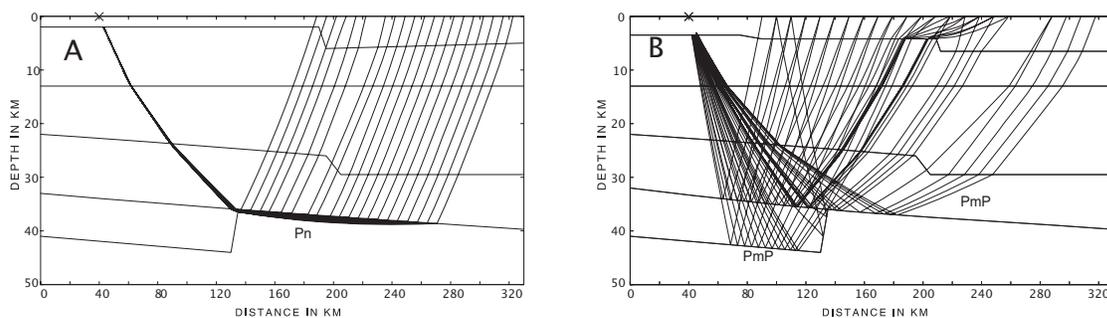


Figura 5.14: Traçado de raio para as fases Pn (A) e PmP (B) no tiro direto do levantamento de Porangatu. O modelo em duas dimensões proposto mostra o comportamento de propagação de ambas as fases na zona de transição entre a Faixa Araguaia e o Arco Magmático de Goiás. Fonte: [Soares 2005].

Apesar da zona de transição entre ambientes geotectônicos, não foram observadas mudanças no modo de extração de segmentos no algoritmo SMF. A inclinação dos 5 segmentos ao longo do perfil foi crescente e nenhum segmento fora desse padrão foi observado. Esta característica deve-se ao bom desempenho do algoritmo de detecção, que apresentou resultados consistentes. Nesse caso o SMF não foi influenciado por falsos positivos detectados antes do tempo de chegada da fase.

Para o grupo de fase classificado como Pg, foi observado um desvio no alinhamento da fase nos traços localizados entre 140 e 170 km de distância da fonte. Esse fenômeno deve-se à influência do corpo anortosítico, com aproximadamente 16 km de extensão, na região do levantamento [Soares et al. 2006]. Apesar de pequena, o corpo gerou anomalia de alta velocidade que resultou na antecipação dos tempos de chegada do alinhamento esperado.

A velocidade de propagação  $v_m$  estimada a partir do alinhamento classificado como Pn foi ligeiramente menor que a velocidade de referência considerada para o levantamento (Tabela 5.11). A leve polarização da estimativa deve-se ao efeito causado pela propagação da Pn na região de transição entre o Arco Magmático de Goiás e a Faixa Araguaia, onde a refração da Moho sofre variação na velocidade aparente de 8,20 km/s para 7,1 km/s, fazendo com que a estimativa de  $v_m$  ficasse abaixo do valor real.

O método de busca pela janela de máxima energia foi utilizada para detecção das chegadas referentes ao grupo de fase PmP. A variância do erro de detecção foi fixada em 0,1 *segundos*<sup>2</sup>. Traços distantes entre 150 e 200 km do tiro foram utilizados para selecionar as fases mais proeminentes da reflexão. A Figura 5.14B mostra os tipos de fases de reflexão provenientes de outros refletores que influenciaram no resultado da detecção da PmP.

Os resultados finais estimados para o perfil direto de Porangatu estão na Tabela 5.11. Os parâmetros obtidos por [Soares et al. 2006] foram inseridos para efeito de comparação do algoritmo. A diferença observada entre os dados estimados foi de 0,18 km/s para velocidade média da crosta, 3,96 km em espessura e 0,09 km/s da velocidade na Moho. A Figura 5.16C mostra o modelo de velocidade construído a partir das estimativas obtidas sobre a estrutura média crustal.

A boa qualidade dos registros sísmicos permitiu que estimativas consistentes fossem obtidas como parâmetro inicial da crosta. Com exceção de  $\hat{v}_m$ , os valores definidos para  $v_c$  e  $h_c$  estão dentro dos intervalos de incerteza calculado para as estimativas  $\hat{v}_c$  e  $\hat{h}_c$ . Apesar de  $\hat{v}_m$  ser menor que o valor esperado pelo modelo de [Soares et al. 2006], o alinhamento formado pelos pontos detectados para Pn forneceu um menor intervalo de incerteza que os outros parâmetros. O principal motivo da polarização da estimativa é atribuído à complexidade estrutural da região mapeada, que apresenta fortes variações laterais na estrutura e velocidade do meio, complicando de sobremaneira a análise e interpretação dos resultados. O fenômeno observado ocorreu na zona de transição entre a Faixa Araguaia e Arco Magmático de Goiás.

Nota-se também que, nos métodos de estimação de  $\hat{v}_c$  e  $\hat{h}_c$ , o intervalo de incerteza resultante é consideravelmente mais alto se comparado com o intervalo de  $\hat{v}_m$ . Essa característica deve-se à dispersão entre os pontos detectados como fase PmP associada ao algoritmo de estimação MV/SIR. A presença de outras fases de reflexão dentro do intervalo de busca deve-se às características complexas observadas na zona de transição entre dois ambientes geotectônicos.

Tabela 5.11: Resultado final da estimação da velocidade de propagação média da crosta  $v_c$ , espessura média crustal  $h_c$ , e velocidade de propagação no manto superior  $v_m$  sob a linha de Porangatu. A comparação dos valores estimados é feita com referência no modelamento realizado por [Soares et al. 2006].

<i>Perfil</i>	$\hat{v}_c$ (km/s)	$\hat{h}_c$ (km)	$v_m$ (km/s)
<b>Real - Direto</b>	<b>6, 5</b>	<b>37, 5</b>	<b>7, 80</b>
Direto	$6,427 \pm 0,130$	$37,36 \pm 4,53$	$7,964 \pm 0,009$
<b>Real - Reverso</b>	<b>6, 5</b>	<b>38, 5</b>	<b>8, 20</b>
Reverso	$6,392 \pm 0,076$	$37,98 \pm 1,68$	$7,753 \pm 0,180$

Levando-se em conta a complexidade estrutural encontrada para o perfil direto de Porangatu, o método mostrou-se capaz de caracterizar um possível modelo de velocidades baseado nos traços adquiridos pelo levantamento de refração sísmica profunda. Nesse caso específico, dados de boa qualidade aparecem como fatores fundamentais para realçar os principais alinhamentos e obter estimativas iniciais consistentes, ainda que o ambiente geotectônico seja complexo.

### 5.3.1.2 Perfil Reverso

O algoritmo de detecção utilizou modelo AR de quarta ordem e valores de incerteza do modelo  $q_{ii} = 10^{-6}$  e medição  $R = 3 \cdot 10^{-7}$  como parâmetros iniciais. 80% dos traços analisados apresentaram diferença menor que 0,20 segundos em relação a marcação do analista. Dois traços localizados a 102 e 189 km de distância da fonte apresentaram diferença maior do que 1 segundo na determinação do tempo de chegada.

O algoritmo SMF adotou o parâmetro de dispersão  $\delta_{max} = 15$ . Ao todo, 8 segmentos de reta foram extraídos da seção sísmica. Dentre os segmentos determinados, 5 segmentos foram classificados como grupo de fase Pg e os 3 restantes caracterizados como Pn. A partir da posição  $(x, t)$  e dispersão dos pontos classificados como Pn, a velocidade de propagação na Moho foi calculada em  $\hat{v}_m = 7,753 \pm 0,180$  km/s (Tabela 5.11).

O método de busca por *skewness* foi utilizado para detecção das chegadas da PmP, com variância de  $\delta_w = 0,1 s^2$ . A busca foi realizada nos traços localizados entre 100 e 150 km de distância do tiro. A partir dos pontos detectados, o estimador MV/SIR determinou a velocidade de propagação e estrutura média da crosta como  $\hat{v}_c = 6,392 \pm 0,076$  km/s e  $\hat{h}_c = 37,98 \pm 1,68$  km (Tabela 5.11). Assim como no levantamento direto, a grade de busca MV baseou-se no ambiente de Arco Magmático, e 100 valores para velocidade e espessura entre 6,19 e 6,49 km/s, e 29,1 e 48,4 km. As estimativas de MV foram suavizadas a partir do método SIR para 10.000 amostras.

As estimativas finais dos parâmetros médios no perfil reverso de Porangatu estão na Tabela 5.11. Os dados propostos por [Soares et al. 2006] são confrontados com os resultados do algoritmo. A diferença observada entre os dados estimados foi de 0,11 km/s para velocidade média da crosta, 1,12 km em espessura e 0,297 km/s da velocidade na Moho.

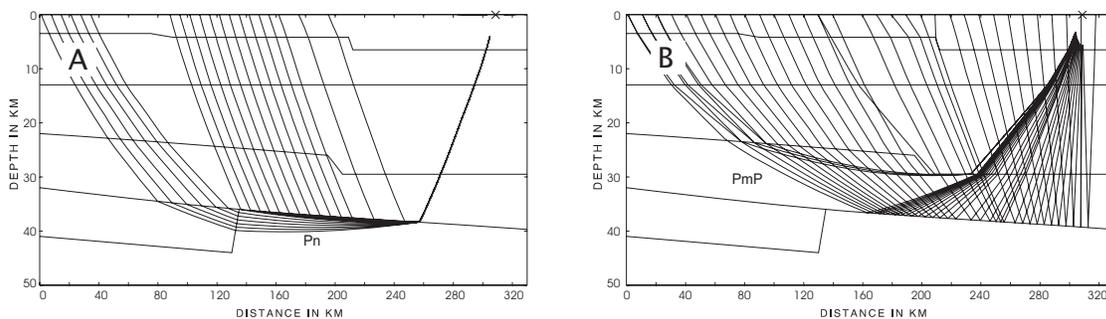


Figura 5.15: Traçado de raio para as fases Pn (A) e PmP (B) no tiro reverso do levantamento de Porangatu. O modelo em duas dimensões proposto mostra o comportamento de propagação das fases na zona de transição entre a Faixa Araguaia e o Arco Magmático de Goiás. Fonte: [Soares 2005].

Como observado no levantamento de refração sísmica de Porangatu, a boa qualidade dos dados resultou no resíduo médio entre o tempo de chegada real e observado menor que o observado no levantamento de Cavalcante. De maneira similar, para eventos com chegadas mais impulsivas, o algoritmo apontou a chegada de fase antes do analista. À medida em que as fases tornaram-se menos proeminentes, os tempos detectados passaram a ser determinados após a marcação do analista. A determinação da chegada no traço localizado a 102 km do ponto de tiro foi tardia devido à característica específica do traço, no qual o modelo foi capaz de descrever os primeiros segundos da ocorrência da fase sem exibir qualquer falha no teste da distância de Mahalanobis. Já para o traço localizado a 189 km de distância, não foi observada qualquer presença de fase, somente ruído de fundo, o que caracteriza um falso positivo no algoritmo. Esses problemas poderiam indicar a necessidade de ajustes nos parâmetros de incerteza ou modelo AR dos modelos do filtro de Kalman. Entretanto, devido ao bom desempenho do filtro, novos ajustes poderiam aumentar o número de falsos positivos da seção.

O resultado da detecção mostra as mesmas falhas de alinhamento nas primeiras quebras apontadas por [Soares et al. 2006]. Na distribuição dos pontos classificados como Pg, o efeito de distorção observada nos traços localizados entre 90 e 120 km deve-se à influência do batólito de Serra Dourada. O corpo está alinhado em norte-sul, com dimensões de 65 km de comprimento e 14 km de largura. Nos pontos classificados com Pn, é observada a mudança do ângulo de inclinação do alinhamento. A partir de 240 km do ponto de tiro, a velocidade de propagação da Pn muda de 8,0 km/s para 7,0 km/s, sugerindo uma irregularidade na superfície da Moho. O degrau na Moho que marca a mudança entre o ambiente de Arco Magmático de Goiás para Faixa Araguaia é apontado com o principal fator na mudança de velocidade da Pn. A Figura 5.15 mostra o modelo proposto em [Soares et al. 2006] com o traçado de raio para o grupo de fase Pn.

As observações da irregularidade no alinhamento das primeiras chegadas não prejudicaram o processo de classificação das fases. Entretanto, devido ao parâmetro de dispersão adotado no algoritmo SMF, as inclinações resultantes dos segmentos extraídos não apresentaram valores crescentes à medida em que afasta-se do ponto de tiro da seção. A mudança de ambiente observada para os pontos classificados como Pn influenciou de maneira direta para obtenção de uma velocidade  $v_m$  menor que a proposta em [Soares et al. 2006], embora o intervalo de incerteza calculado seja

maior devido à dispersão dos pontos.

A Figura 5.16 mostra o resultado dos processos de detecção de fases e estimação dos parâmetros físicos da crosta para o perfis direto e reverso de Porangatu. Levando em conta as complexidades aferidas no perfil em duas dimensões [Soares et al. 2006] e a boa qualidade dos registros, estimativas consistentes foram obtidas pelo método proposto. Com exceção de  $\hat{v}_m$ , os valores definidos para  $v_c$  e  $h_c$  estão dentro dos intervalos de incerteza. Apesar de  $\hat{v}_m$  ser menor que o valor esperado, o fenômeno observado na zona de transição entre o Arco Magmático de Goiás e a Faixa Araguaia constitui o principal motivo da polarização da estimativa da velocidade no manto superior.

Com exceção de  $\hat{v}_m$ , as estimativas obtidas para a velocidade de propagação e espessura média da crosta coincidem com os valores reais da Tabela 5.11. As fases detectadas e os parâmetros estimados para a crosta são confirmados pela proeminência das fases PmP nos traços. Apesar da variância do resíduo  $\delta_w$ , estipulada para o algoritmo de busca por grade, ser maior do que a considerada para os dados sintéticos, as estimativas calculadas ficaram de acordo com estrutura proposta por [Soares et al. 2006].

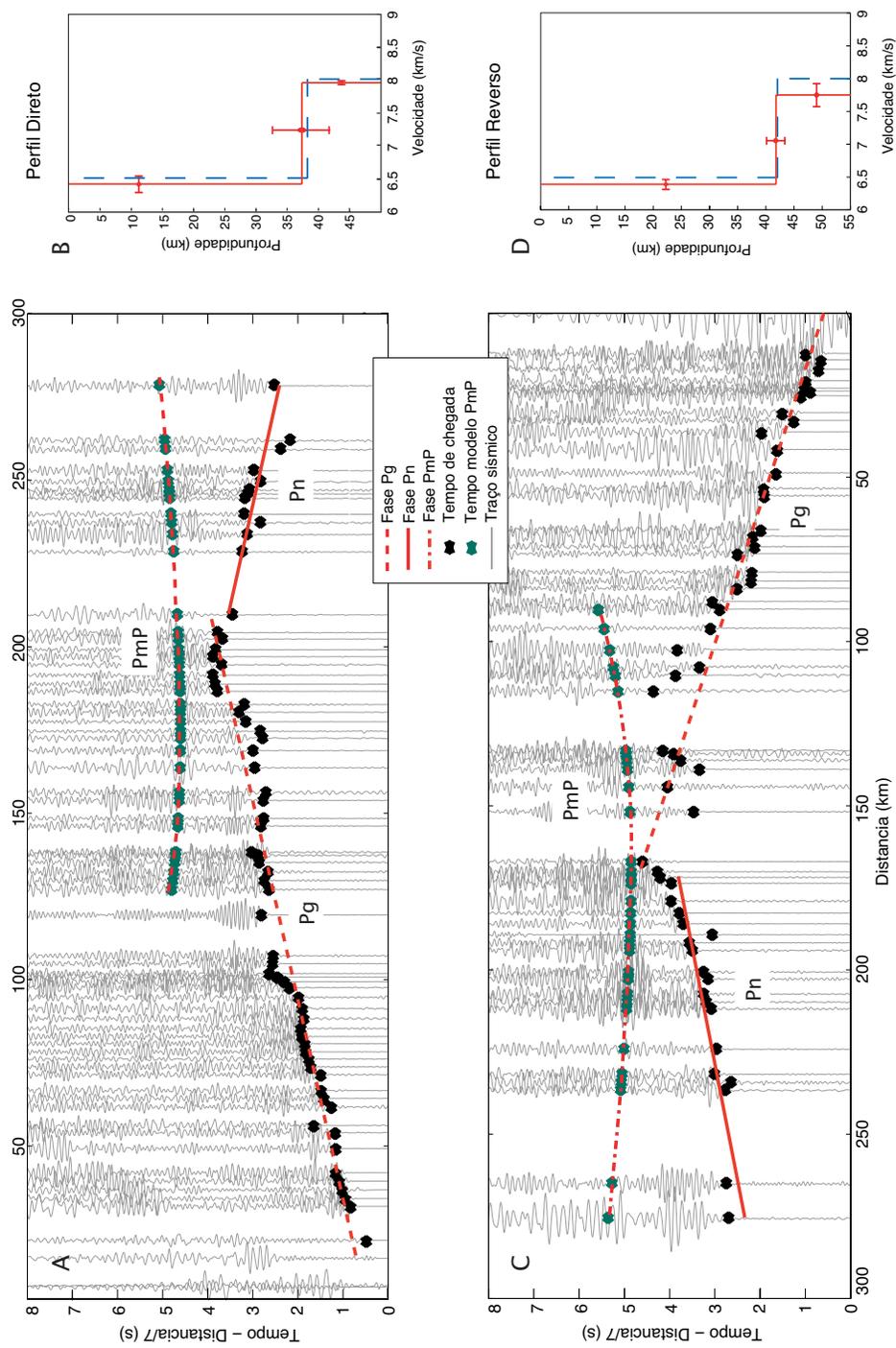


Figura 5.16: Resultado final do algoritmo de detecção dos parâmetros médio da crosta continental para levantamento de refração sísmica profunda de Porangatu. As detecções de fase são representadas graficamente pelos pontos em vermelho (detectados) e verdes (modelados) nas seções (A) e (C). Os modelos de velocidade real (azul) e estimado (vermelho) são mostrados em (B) e (D) para os perfis direto e reverso.

### 5.3.2 Linha Sísmica de Cavalcante

Dos 120 sensores instalados no levantamento de Cavalcante, 58 registros obtidos pelo tiro 1 e 72 registros do tiro 7 foram descartados da base de dados em inspeção visual, por não apresentarem qualquer característica de um evento sísmico presente. Fatores como mal funcionamento dos equipamentos durante o levantamento, elevado nível de ruído de fundo nos traços contribuíram para este elevado índice de descarte em ambos os tiros.

O método de estimação dos parâmetros médios da crosta continental basearam-se em um ambiente tectônico de Escudos e Plataformas, com valores de busca definidos para  $v_c$  entre 6,22 e 6,42 km/s, e para  $h_c$  entre 35,7 e 47,3 km. O resultado da busca do máximo da verossimilhança por grade foi ajustada pelo algoritmo SIR com 10.000 amostras.

As Figuras 5.17A e 5.18A mostram os registros de Cavalcante em sua forma bruta. Para eliminar o excesso de informações presentes nos dados, filtros em frequência foram aplicados para concentrar faixa espectral das fases primárias em refração sísmica profunda. O conteúdo espectral durante a chegada de um evento sísmico concentra-se entre 2 e 16 Hz. O filtro passa-banda do tipo *Butterworth* de terceira ordem e frequência de corte entre 2 e 10 Hz foi utilizado. A convolução do filtro com os traços deu-se de forma direta e reversa para não inserir distorção em fase dos registros (filtro fase zero).

Devido ao alto índice de descarte de traços, ambos os perfis apresentam uma distribuição não-homogênea dos traços com zonas de “sombra” entre 100 e 220 km para o perfil direto, e 180 e 300 km no perfil reverso (Figuras 5.17 e 5.18). Os traços adquiridos no tiro direto são caracterizados pelo tempo de quebra visível para as fases Pg e Pn, e pela proeminência da reflexão PmP [Soares et al. 2006]. As primeiras quebras no perfil reverso não são claras, principalmente na região de ocorrência da Pn, mas as chegadas do grupo de fases refletidas na Moho são perceptíveis dentro da seção sísmica.

A alta absorção observada nos sismogramas constitui outra característica presente no levantamento de Cavalcante. Em ambos os perfis, principalmente o reverso, o alto índice de absorção é notado pela baixa qualidade apresentada nos registros. Apesar de apresentar chegadas visíveis e reflexões proeminentes, observa-se que a atenuação de amplitude nos traços é gradativa à medida que o traço localiza-se mais distante da fonte. No perfil reverso, essa característica é observada pela baixa qualidade dos registros que não foram descartados da seção.

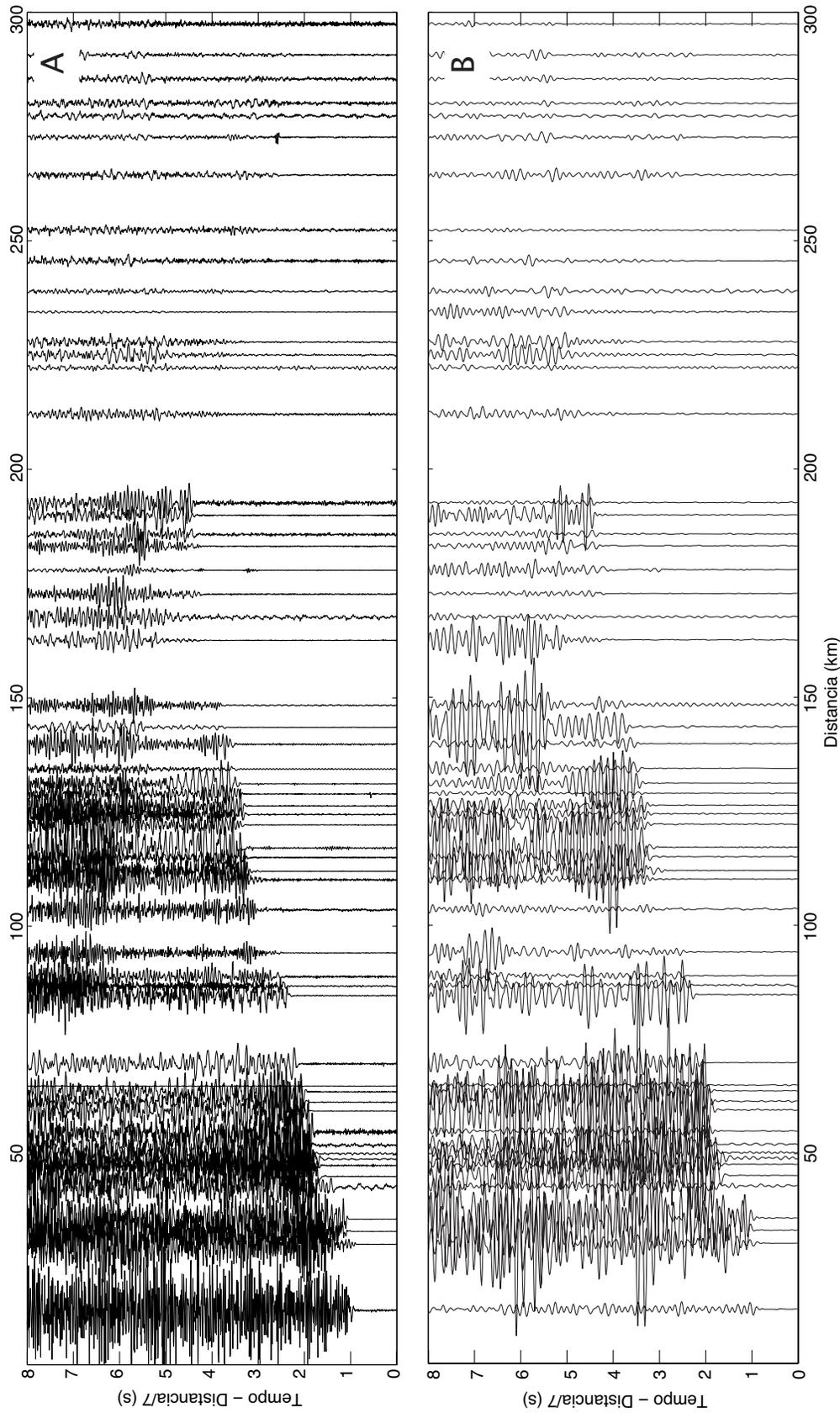


Figura 5.17: Sismograma composto do tiro direto obtido a partir do levantamento de refração sísmica profunda realizado em Cavalcaute. Para restringir o espectro de frequências e eliminar informações que possam atrapalhar o processo de estimação, os traços na forma bruta (A) foram filtrados por um filtro passa-banda (B) com frequência de corte entre 2 e 10 Hz. O período de amostragem dos registros é de  $T_{acq} = 0,007$  segundos, e o sismograma foi reduzido em 7 km/s.

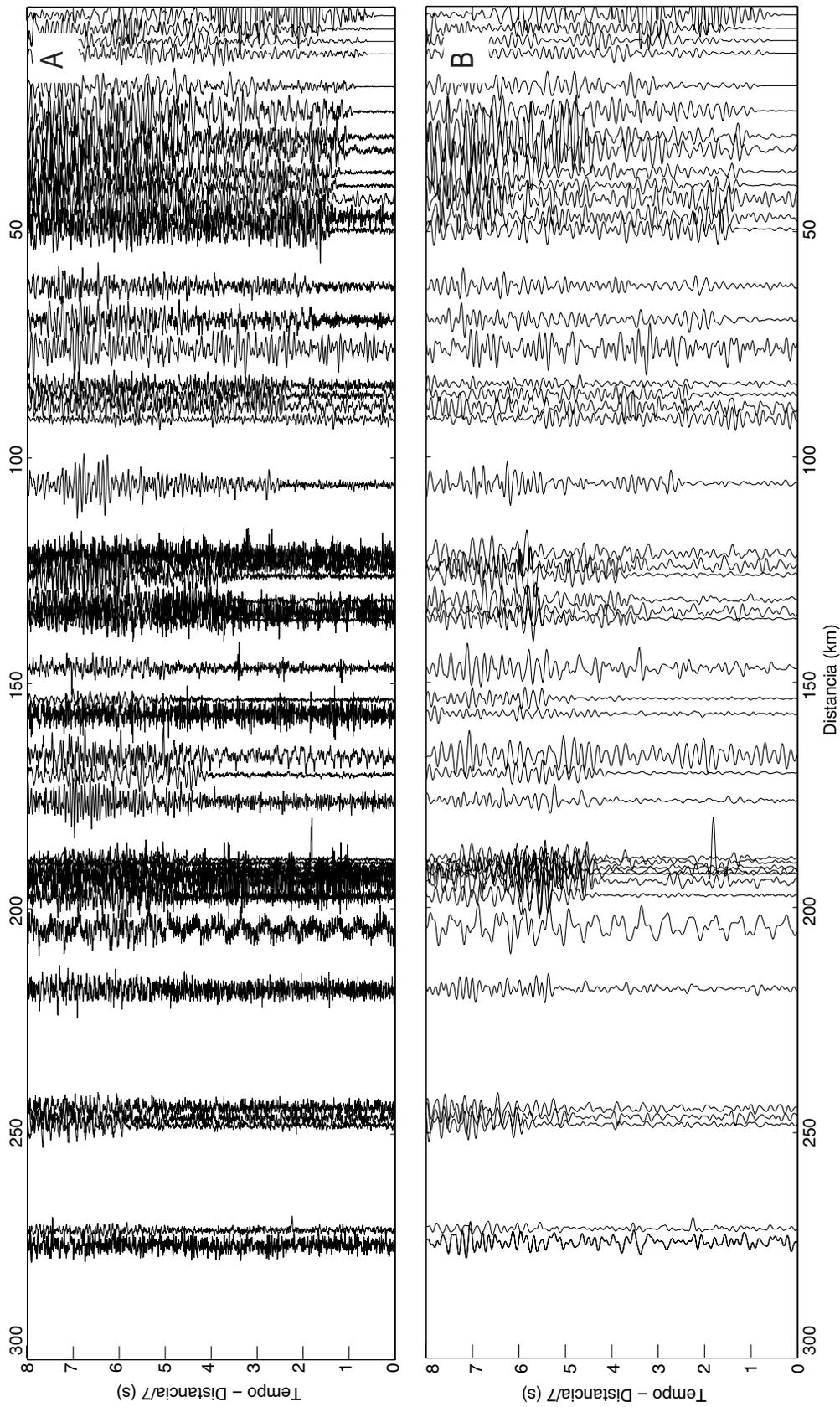


Figura 5.18: Sismograma composto do tiro reverso obtido a partir do levantamento de refração sísmica profunda realizado em Cavalcante. Para restringir o espectro de frequências e eliminar informações que possam atrapalhar o processo de estimação, os traços na forma bruta (A) foram filtrados por um filtro passa-banda (B) com frequência de corte entre 2 e 10 Hz. O período de amostragem dos registros é de  $T_{acq} = 0,007$  segundos, e o sismograma foi reduzido em 7 km/s..

### 5.3.2.1 Perfil direto

Utilizando modelo AR de quarta ordem e parâmetros de incerteza do modelo  $q_{ii} = 8 \cdot 10^{-7}$  e medição  $R = 5 \cdot 10^{-6}$ , 78% dos traços analisados apresentaram diferença menor que 0,20 segundos em relação a marcação feita por analista humano. Em dois casos de traços contaminados por ruído de fundo, localizados a 222,22 e 287,49 km da fonte, a determinação do tempo de chegada apresentou diferença maior do que 1 segundo.

Devido a baixa qualidade e quantidades de registros, o parâmetro de dispersão adotado para o algoritmo SMF foi  $\delta_{max} = 15$ . Ao todo, 7 segmentos de reta foram extraídos dentro da seção sísmica. Dentre eles, 4 segmentos foram classificados como grupo de fase Pg e os 3 restantes caracterizados como Pn. A partir da posição  $(x, t)$  e dispersão dos pontos classificados como Pn, a velocidade de propagação na Moho foi calculada em  $\hat{v}_m = 8,246 \pm 0,011$  (Tabela 5.12).

O método de busca por *kurtosis* foi utilizado para detecção das chegadas referentes ao grupo de fase PmP. A variância do erro de detecção foi fixada em 0,1 segundos. Traços localizados entre 70 e 120 km de distância do tiro foram utilizados no intuito de selecionar as fases mais proeminentes da reflexão. A partir dos pontos detectados, o estimador MV/SIR determinou a velocidade de propagação e estrutura média da crosta como  $\hat{v}_c = 6,434 \pm 0,113$  km/s e  $\hat{h}_c = 44,90 \pm 1,93$  km (Tabela 5.12).

Os resultados finais para os parâmetros médios da estrutura crustal estimados para Cavalcante estão na Tabela 5.12. Os dados propostos por [Soares et al. 2006] foram inseridos para efeito de validação do algoritmo. A diferença observada entre os dados estimados e o modelo foi de 0,04 km/s para velocidade média da crosta, 1,9 km para espessura e 0,046 km/s para velocidade no manto superior. Para todos os parâmetros, o valor real está contido dentro do intervalo de confiança aferido.

Apesar da considerável diferença de tempo do analista na marcação da chegada da quebra em dois traços na seção (maior que 1 segundo), o algoritmo de detecção mostrou-se eficiente na determinação do tempo de chegada das fases primárias. A diferença observada ocorre com mais frequência em detecções de tempos posteriores à primeira chegada, o que indica a necessidade de ajustes nos parâmetros de incerteza considerados para os modelos de estimação do filtro de Kalman.

Verificou-se que o comportamento espacial dos pontos detectados deu-se de forma crescente e uniforme, sem nenhuma alteração lateral brusca, principalmente nas regiões referentes a fase Pg. Essa característica, também observada por [Soares et al. 2006], é traduzida na forma de uniformidade na composição do meio percorrido pelas frentes de onda. O método SMF confirma essa característica através da extração de segmentos com declividade decrescente dentro da região da Pg (Anexo I). Apesar da distribuição espacial irregular dos traços sísmicos, o processo de extração não foi prejudicado na determinação dos segmentos de reta, fato confirmado pelo processo de classificação dos grupos de fase.

A Figura 5.19A mostra o resultado dos processos de detecção de fases e estimação dos parâmetros físicos da crosta para o perfil direto de Cavalcante. Apesar do comprometimento da qualidade dos traços causada pela absorção do meio, as primeiras quebras ainda permaneceram visíveis. Isso

Tabela 5.12: Resultado final da estimação da velocidade de propagação média da crosta  $v_c$ , espessura média crustal  $h_c$ , e velocidade de propagação no manto superior  $v_m$  sob a linha de Cavalcante. A comparação dos valores estimados é feita com referência no modelamento realizado por [Soares et al. 2006].

<i>Perfil</i>	$\hat{v}_c$ (km/s)	$\hat{h}_c$ (km)	$v_m$ (km/s)
<b>Real - Direto</b>	<b>6, 43</b>	<b>43, 0</b>	<b>8, 28</b>
Direto	$6, 434 \pm 0, 113$	$44, 901 \pm 1, 925$	$8, 246 \pm 0, 012$
<b>Real - Reverso</b>	<b>6, 45</b>	<b>42, 0</b>	<b>8, 20</b>
Reverso	$6, 589 \pm 0, 062$	$51, 98 \pm 1, 43$	$8, 095 \pm 0, 149$

facilitou o processo de detecção, principalmente para os traços mais distantes em relação à fonte sísmica. A velocidade da fase Pn estimada está de acordo com o encontrado por [Soares et al. 2006]. A quantidade de pontos de suporte classificados como Pn possibilitou que a estimativa obtida estivesse dentro do estipulado. No entanto, fatores como dispersão nos pontos detectados, heterogeneidades topográficas na superfície e na Moho, além de variações laterais da velocidade de propagação, contribuíram para o aumento do intervalo de incerteza para a estimativa de  $v_m$ .

Por constatação visual é possível confirmar que as estimativas obtidas para a velocidade de propagação e espessura média da crosta coincidem com os valores reais da Tabela 5.12. As fases detectadas e os parâmetros estimados para a crosta são confirmados pela proeminência das fases PmP. Apesar da variância do resíduo  $\delta_w$ , estipulada para o algoritmo de busca por grade, ser maior do que a considerada para os dados sintéticos, as estimativas reais ficaram de acordo com estrutura real [Soares et al. 2006].

### 5.3.2.2 Perfil reverso

De maneira semelhante ao perfil direto, adotou-se modelo AR de quarta ordem para o processo de detecção. Os parâmetros de incerteza foram de  $q_{ii} = 9 \cdot 10^{-7}$  para o modelo  $R = 8 \cdot 10^{-5}$  para medição. Dos 48 traços aproveitados do levantamento, 70% apresentaram diferença menor que 0,20 segundos em relação a marcação feita por analista humano (Anexo I). Devido a baixa qualidade observada nos traços selecionados, houveram casos em que não foi possível determinar o tempo correto de chegada sem o auxílio dos registros adjacentes. Por exemplo, no traço localizado a 83,76 km da fonte, onde o algoritmo de detecção determinou o tempo de chegada com auxílio do traço anterior. Aliado a esse fato, observa-se que a qualidade do registro afetou diretamente o alto grau de dispersão dos pontos detectados.

O parâmetro de dispersão adotado para o perfil foi de  $\delta_{max} = 30$ . Ao todo, 4 segmentos foram extraídos, dentre os quais os três localizados entre o ponto de tiro e 200 km foram classificados como grupo de fase Pg. O último segmento, localizado a partir de 220 km da fonte, e com 7 pontos de suporte, foi classificado com Pn. Para esse grupo de fase, a velocidade de propagação na Moho foi calculada em  $\hat{v}_m = 8, 095 \pm 0, 149$ , abaixo do previsto por [Soares et al. 2006] (Tabela 5.12).

O valor discrepante de  $v_m$  entre o obtido pelo algoritmo e o valor real é devido à baixa quali-

dade observada nos traços, que apresentaram dificuldades de detecção mesmo os próximos à fonte sísmica, a descontinuidade espacial dos registros, principalmente dos localizados entre 160 e 210 km distância da fonte. A distribuição não-uniforme dos sensores prejudica o processo SMF, uma vez que os cálculos de membresia são dependentes do ponto no espaço versus tempo  $(x, t)^T$ . Os dois fatores contribuíram de forma direta para divergência da estimação de  $v_m$ , ocasionando em polarização em cascata na estimação dos parâmetros médios da crosta continental, apesar das fases proeminentes da PmP observadas na Figura 5.18 e comentadas em [Soares et al. 2006].

Uma vez que a estimação de  $v_m$  não foi bem-sucedida, a escolha do método de detecção da PmP por grade não faz sentido, porque os pontos iniciais de busca da fase definidos com base na extrapolação da fase Pn estarão fora do ponto crítico. Uma vez que o segmento classificado como Pn está incorreto, o intervalo de busca para a PmP também estará errado. Para efeito ilustrativo, utilizou-se o método de máxima energia para determinação dos pontos base de estimação dos parâmetros da crosta.

Com base nos pontos detectados como PmP, as estimativas para crosta, obtidas pelos métodos MV e SIR, ficaram  $\hat{v}_c = 6,589 \pm 0,062$  km/s e  $\hat{h}_c = 51,99 \pm 1,43$  km. Como era esperado, a considerável divergência entre o resultado real e o estimado deve-se à estimativa polarizada de  $v_m$ . A Figura 5.19B compara o modelo obtido com os valores reais, bem como a chegada da fase PmP para os parâmetros estimados. A Figura 5.19B mostra a diferença na seção entre a real ocorrência da PmP e a chegada modelada pelo algoritmo.

A baixa qualidade apresentada na seção e o alto índice de descarte dos traços com problemas, ocorridos principalmente na região da Moho (traços com distância maior que 200 km do ponto de tiro) foram os fatores que resultaram no erro de estimação dos parâmetros médios da crosta. Esses fatos levam a crer que, em alguns casos, a baixa qualidade nos dados e a má distribuição dos sensores não forneceram informações suficientes para que os parâmetros fossem corretamente estimados.

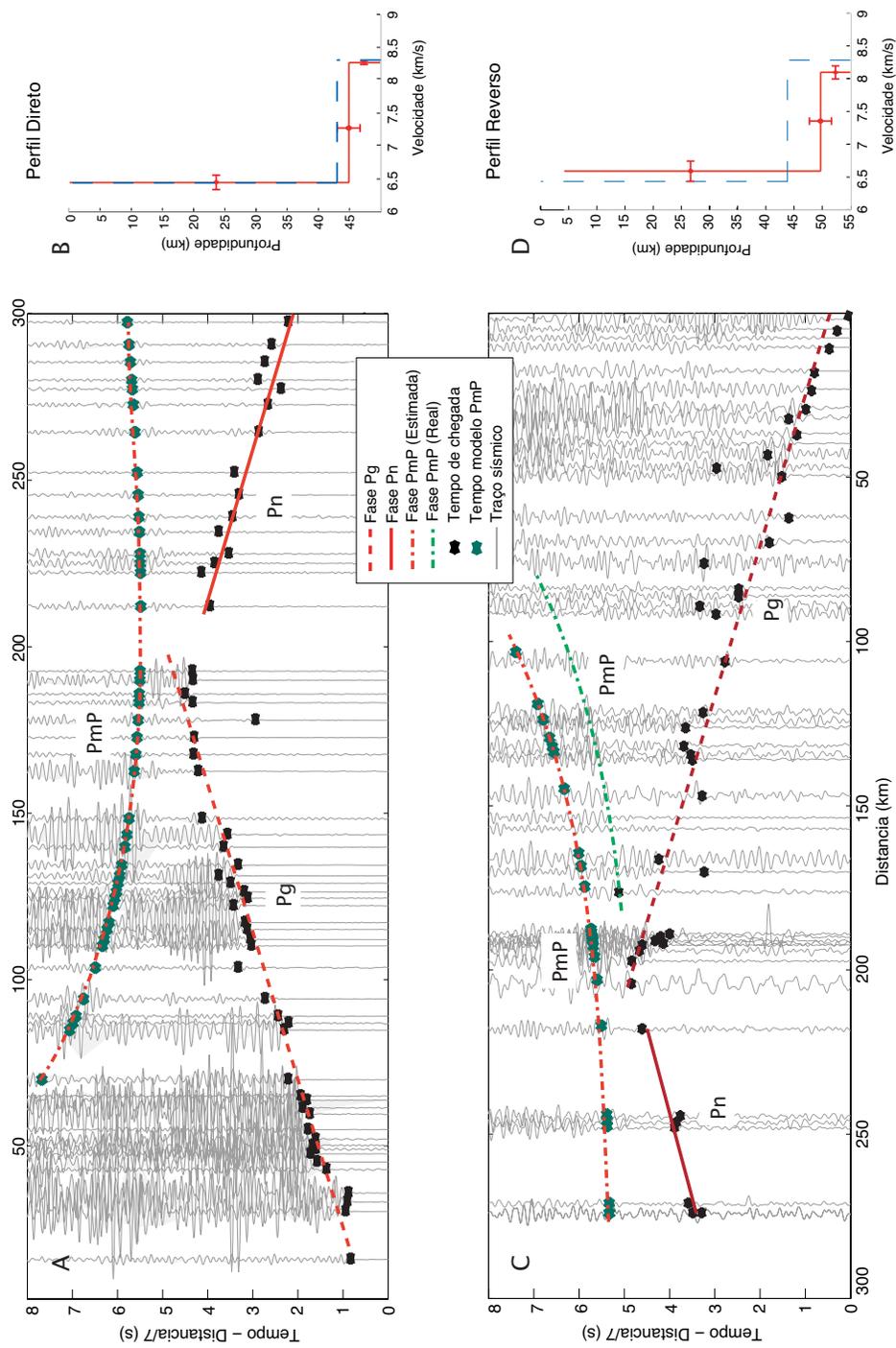


Figura 5.19: Resultado final do algoritmo de detecção das fases Pg, Pn e PmP e estimação dos parâmetros médio da crosta continental para levantamento de refração sísmica profunda de Cavalcante. As detecções de fase são representadas graficamente pelos pontos em vermelho nas seções (A) e (C). Os pontos em verde representam a chegada modelada pelos parâmetros da crosta na construção da PmP. Os modelos de velocidade real (azul) e estimado (vermelho) são mostrados em (B) e (D) para os perfis direto e reverso.

# Capítulo 6

## Conclusões

Este trabalho apresentou um algoritmo automático para caracterização inicial dos parâmetros médios da crosta continental em dados de refração sísmica profunda. O algoritmo proposto utilizou técnicas de processamento de sinais aplicados em sismogramas compostos para estimação da velocidade compressional média na crosta continental e do manto superior, e estimar a profundidade da descontinuidade de Moho.

A principal motivação deste trabalho partiu da necessidade do aperfeiçoamento do processo de análise de dados de refração sísmica, realizado normalmente de forma manual. Empregando soluções automáticas, pretendeu-se criar um modelo inicial para que o analista de dados tenha um guia para a determinação dos detalhes sobre a estrutura crustal, ou como parâmetro de entrada para técnicas de modelagem inversa.

As principais contribuições deste trabalho podem ser sintetizadas nos seguintes algoritmos:

- Detecção das chegadas em sismograma composto para construção da curva de tempo de percurso das primeiras fases;
- Classificação dos pontos da curva de tempo de trânsito em grupos de fase Pn e Pg;
- Detecção do tempo de chegada do grupo de fase PmP;
- Estimação dos seguintes parâmetros: velocidade de propagação das ondas compressonais no manto superior e na crosta, e espessura média da crosta.

De posse das estimativas, é construído um modelo de velocidade de uma dimensão. Os métodos foram empregados de tal modo que seus resultados serviram como parâmetros de entrada para os algoritmos seguintes. Cada etapa desenvolvida desempenhou uma função específica para transformar os valores de entrada em informações físicas para construção do modelo de velocidade. Em cada etapa, parâmetros iniciais de ajuste foram determinados considerando o ambiente geotectônico e qualidade dos dados adquiridos, características intrínsecas para cada levantamento de refração sísmica.

O primeiro processo abordado destacou a detecção das primeiras quebras em sismogramas compostos (capítulo 2). O método caracterizou o ruído sísmico de fundo no forma de modelos

autoregressivos (AR), e a evolução de seus coeficientes foi observada utilizando filtro de Kalman. A determinação da fase foi feita com base em teste estatístico qui-quadrático para verificar o comportamento do modelo AR. O tempo de chegada da fase foi determinado caso alguma alteração no teste fosse observada.

Os pontos detectados foram utilizados no processo de identificação e classificação dos grupos de fases Pg e Pn. O problema foi abordado utilizando um algoritmo de segmentação de retas para identificação dos trechos (SMF). A classificação em grupos de fase foi feita investigando-se a inclinação angular de cada segmento extraído. Os grupos classificados serviram como base para construção do modelo de velocidades.

A detecção da PmP foi fundamentada na informação de que seus tempos de chegada fornecem melhores informações sobre a totalidade da crosta. Alto coeficiente de refletividade e encontro com o grupo de fase Pn, na região de incidência crítica, auxiliam na determinação do tempo de chegada. Assim que identificados, os pontos pertencentes à PmP são agrupados e utilizados como parâmetro de entrada na estimação dos parâmetros da crosta.

A velocidade de propagação no manto foi estimada com base no coeficiente angular do segmento classificado como Pn. A estimação foi feita a partir da Transformada Unscented, aplicada com base na transformação entre coordenadas polares e cartesianas.

A estimação da velocidade e espessura média da crosta deu-se pela construção de uma grade de possíveis soluções de acordo com o ambiente geotectônico. Os parâmetros devem maximizar a função do máximo da verossimilhança do resíduo entre o tempo detectado e a equação que descreve a formação da PmP. A estimação por SIR foi aplicada para reduzir os efeitos causados pela discretização do processo de busca. A partir das estimativas médias obtidas para a crosta e manto superior, foi construído o modelo de velocidades. Os algoritmos utilizados para tratamento dos registros e estimação dos parâmetros foram codificados em ambiente MATLAB. Os códigos implementados foram subdivididos de acordo com a função específica a ser desempenhada.

Sismogramas sintéticos foram utilizados como base de dados para validação do algoritmo proposto. Os registros foram gerados pelo pacote de traçado de raios para modelagem direta em duas dimensões, SEIS88 [Molotkov 1977]. Os traços foram contaminados com seqüência Gaussiana gerada para simular ruído sísmico de fundo, aproximando-se de registros reais. Para todas as etapas envolvidas no processo de estimação, o algoritmo forneceu resultados consistentes com os parâmetros utilizados no modelo de geração dos sismogramas sintéticos. Considerando o processo para os perfis direto e reverso, as maiores diferenças das estimativas obtidas com os dados iniciais foram de 0,07 km/s para velocidade média da crosta ( $v_c$ ), 0,325 km para espessura média crustal ( $h_c$ ), e 0,077 km/s na velocidade de propagação no manto ( $v_m$ ).

O método proposto foi aplicado em dados reais de levantamentos de refração sísmica profunda na Província Tocantins como estudo de caso. A base de dados utilizada considerou os tiros localizados nos extremos das linhas sísmicas de Cavalcante e Porangatu. A utilização de dados reais serviu para avaliar o desempenho do algoritmo e apontar suas maiores limitações do levantamento (qualidade dos registros, alinhamento dos sensores na linha e/ou complexidades geológicas) são encontrados em levantamentos reais.

O levantamento de Cavalcante caracterizou-se pela alta absorção do meio observada na seção sísmica. Como consequência, a baixa relação entre o sinal coerente e ruído de fundo reduziu a qualidade dos registros utilizados para construção do modelo. O modelo de velocidades estimado para o perfil direto apresentou estimativas consistentes com o modelo de referência, mas a dispersão observada no alinhamento dos grupos de fase Pg, Pn e PmP aumentou o desvio padrão das estimativas. O elevado índice de descarte de sismogramas sem informações também influenciou negativamente nos parâmetros estimados pelo algoritmo por meio da estimação polarizada da velocidade de propagação no manto superior. Essa observação foi feita em traços utilizados no perfil reverso, onde a falta de pontos que representam a fase Pn resultou uma estimação polarizada da velocidade do manto superior. O mesmo erro foi verificado na determinação no tempo de chegada da PmP devido à dependência das fases Pn para determinação do ponto inicial de busca.

O levantamento de Porangatu possui como principal característica a complexidade estrutural resultante do amalgamento de regiões tectônicas presentes ao longo do seção sísmica. A boa qualidade observada nos registros mostram a baixa absorção no meio propagado. Em ambos os perfis as estimativas e o intervalo de incerteza calculados para a velocidade e espessura média da crosta estão de acordo com as propriedades estipuladas pelo levantamento real. A velocidade de propagação no manto superior estimada foi menor que a velocidade real no perfil direto devido ao mergulho da Moho em direção oeste-leste, resultando em falseamento da velocidade para valor abaixo do real. No perfil reverso, apesar do efeito da presença do mergulho acima da Moho ser esperado, a velocidade no manto superior estimada foi menos que a real devido à zona de transição entre a Moho no Arco Magmático de Goiás para a crosta inferior da Faixa Araguaia. Este efeito, claramente visualizado na seção sísmica, resultou em estimação tendenciosa da velocidade do manto.

Com exceção do perfil reverso de Cavalcante os modelos construídos forneceram estimativas consistentes sobre os parâmetros médios crustais, apesar das limitações e complexidades estruturais encontradas. Apesar do boa performance observada no detector de primeiras chegadas, algumas considerações sobre seu princípio de atuação fazem-se necessárias. A heterogeneidade observada no ruído de fundo em registros provenientes de um mesmo levantamento sugere o desenvolvimento de técnicas de estimação adaptativa dos parâmetros de incerteza para os modelos de estado e medição utilizados no filtro de Kalman.

As limitações do algoritmo proposto puderam ser evidenciadas quando a base de dados reais foi utilizada para construção do modelo. A heterogeneidade observada entre os registros em relação à distância da posição do tiro em cada perfil mostra que o ruído de fundo e o sinal coerente não apresentam o mesmo comportamento. Como consequência, os parâmetros de incerteza utilizados estimação do algoritmo de detecção podem não funcionar em todos os registros em uma mesma seção. Diferente do observado na base de dados sintéticas, o considerável índice de descarte de registro sem informação resultou em uma distribuição de traços não homogênea na seção sísmica.

Como o algoritmo SMF realiza a extração dos segmentos de reta por meio da análise da dispersão dos pontos  $(x, t)$ , a não homogeneidade na distribuição acarretou em extração equivocada, corrigidas somente com a adoção de um índice dispersão maior. A possível solução para este tipo de problema encontra-se na aplicação de técnicas que objetivam suavizar bases de dados incompletas

partindo de um modelo estocástico para descrever o alinhamento das fases. Cadeias de Markov e algoritmos EM constituem algumas técnicas que podem ser utilizadas para suavizar o problema de espaçamento entre os pontos detectados.

A concepção adotada para estimação dos parâmetros médios da crosta baseado na detecção do tempo da chegada da PmP, associada à construção da grade de soluções, constitui um ponto de fragilidade no algoritmo de construção de modelo de velocidades. Tal ponto deve ser ressaltado partindo do princípio que, detectados os pontos da PmP, os parâmetros da grade de busca ajustam-se à distribuição resultante da detecção, sem realizar nenhum tipo de realimentação ou leitura recursiva nos traços selecionados. Caso não seja verificada a presença da chegada da PmP na janela de análise, o algoritmo inevitavelmente fornecerá uma estimativa polarizada, contribuindo para uma interpretação errônea dos parâmetros da crosta.

Algoritmos de estimação iterativos podem ser utilizados de forma a realimentar o processo de estimação, tornando-o mais robusto a erros de detecção da PmP. A adoção de técnicas de estimação baseada nos M-estimadores possibilitaria o processo determinar os parâmetros de forma iterativa, onde seu ajuste seria realizado a partir da correção dos tempos de chegada de acordo com o intervalo considerado para espessura e velocidade de propagação na crosta.

Em suma, as seguintes sugestões podem ser citadas para continuidade dos trabalhos:

- Detecção das primeiras chegadas:
  - Reformulação do modelo adotado para o traço sísmico, onde poder-se-ia considerar a dependência lateral dos traços sísmicos no modelo de evolução de estados do filtro de Kalman;
  - Buscar novos métodos ou soluções para implementação do filtro de Kalman adaptativo;
  - Implementar meios de interação com o usuário, onde seria possível a correção do tempo de chegada, em caso de erro de detecção.
- Identificação e classificação dos grupos de fase Pg e Pn:
  - Incorporação de algoritmos de estimação em bancos de dados incompletos (Cadeias de Markov e Algoritmos EM);
  -
- Detecção da fase PmP e estimação da velocidade média e espessura da crosta:
  - Desenvolvimento de técnicas robustas de estimação que levam em consideração critérios como recursividade e realimentação de dados
- Exploração do grupo de fases Pg, não utilizados neste trabalho para levantamento do modelo de velocidades.

# REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [Akaike 1973]AKAIKE, H. Information Theory and an Extension of the Maximum Likelihood Principle. In: *Petrov, B., Csaki, F., 2nd International Symposium on Information Theory. Budapest Akademiai Kiado*, v. 1, p. 267–281, 1973.
- [Allen 1982]ALLEN, R. Automatic Phase Pickers: Their Present Use and Future Prospects. *Bulletin of the Seismological Society of America*, v. 72, n. 6, p. S225–S242, December 1982.
- [Arulampalam et al. 2002]ARULAMPALAM, S. et al. A tutorial on particle filters for on-line non-linear/non-gaussian bayesian tracking. *IEEE Transaction in Signal Processing*, v. 50, n. 2, p. 174–188, February 2002.
- [Baer M. & Kradolfer 1987]BAER M. & KRADOLFER, U. An Automatic Phase Picker for Local and Teleseismic Earthquakes. *Bulletin of the Seismological Society of America*, v. 77, n. 4, p. 1437–1445, August 1987.
- [Bezdeck J.C. & Hathaway 1992]BEZDECK J.C. & HATHAWAY, R. Numerical convergence and interpretation of the fuzzy c-shells clustering algorithm. *IEEE Transactions on Neural Networks*, v. 3, n. 5, p. 787–793, September 1992.
- [Borges e Aldon 2000]BORGES, G. A.; ALDON, M. A split-and-merge segmentation algorithm for line extractions in 2-d range images. In: *15th International Conference on Pattern Recognition*. [S.l.: s.n.], 2000.
- [Bormann 2002]BORMANN, P. (Ed.). *New Manual of Seismological Observatory Practice*. [S.l.]: GeoForschungsZentrum Potsdam, 2002.
- [Brown e Hwang 1997]BROWN, R. G.; HWANG, P. Y. C. *Introduction to Random Signals and Applied Kalman Filtering*. 3rd. ed. [S.l.]: John Wiley & Sons, 1997.
- [Christensen e Mooney 1995]CHRISTENSEN, N. I.; MOONEY, W. D. Seismic velocity structure and composition of the continental crust: A global view. *Journal of Geophysical Research (Solid Earth)*, v. 100, p. 9761–9788, jun. 1995.
- [Cuenot 2001]CUENOT, O. Les Algorithmes de Détection Automatique d’ondes Sismiques. N/A. 2001.
- [Dai e MacBeth 1995]DAI, H.; MACBETH, C. Automatic Picking of Seismic Arrivals in Local Earthquake Data Using and Artificial Neural Network. *Geophysical Journal International*, v. 102, n. 6, p. 758–774, March 1995.

- [Dai e MacBeth 1997]DAI, H.; MACBETH, C. The Application of Backpropagation Neural Network to Automatic Picking Seismic Arrivals from Single-Component Recordings. *Journal of Geophysical Research*, v. 102, n. B7, p. 15105–15113, July 1997.
- [Davé e Krishnapuram 1997]DAVÉ, R.; KRISHNAPURAM, R. Robust clustering methods: A unified view. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, IEEE, v. 5, n. 7, p. 270–293, 1997.
- [Duda e Stork 2000]DUDA, P. E. H. R. O.; STORK, D. G. *Pattern Classification*. 2. ed. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2000.
- [Durrant-Whyte 2000]DURRANT-WHYTE, S. J. . J. U. . H. F. A New Method for the Nonlinear Transformation of Means and Covariances in Filters and Estimators. *IEEE Transactions on Automatic Control*, IEEE, v. 45, n. 3, p. 477–482, March 2000.
- [Earle e Shearer 1994]EARLE, P. S.; SHEARER, P. M. Characterization of Global Sesimograms Using an Automatic-picking Algorithm. *Bulletin of the Seismological Society of America*, v. 84, n. 2, p. 366–376, April 1994.
- [Geldar 1995]GELDAR, R. S. . L. *Exploration Seismology*. [S.l.]: Cambridge University Press, 1995. 592 p.
- [Giese 1976]GIESE, P. Explosion seismology in central europe. In: \_\_\_\_\_. [S.l.]: Springer-Verlag, 1976. cap. Depth Calculation.
- [Giese 1976]GIESE, P. Explosion seismology in central europe. In: \_\_\_\_\_. [S.l.]: Springer-Verlag, 1976. cap. Problems and Tasks of Data Generalization.
- [GSE/JAPAN/40 1992]GSE/JAPAN/40. A Fully Automated Method for Determination the Arrival Times of Seismic Waves and its Application to an On-line Processing System. *Paper tabled in the 34th GSE session in Geneva GSE/RF/62, G.S.E.*, 1992.
- [Haralick 1994]HARALICK, R. M. Propagating Covariances in Computer vision. In: *International Conference on Pattern Recognition*. [S.l.: s.n.], 1994. p. 493–498.
- [Haykin 2001]HAYKIN, S. *Redes Neurais: Princípios e Prática*. 2. ed. [S.l.]: Bookman, 2001.
- [Holbrook, Mooney e Nicholas 1992]HOLBROOK, W.; MOONEY, W.; NICHOLAS, I. The seismic velocity structure of the deep continental crust. *Continental Lower Crust Dev. Geotectonics*, v. 96, p. 1–34, 1992.
- [Hsu 1997]HSU, H. P. *Probability, Random Variables and Random Processes*. [S.l.]: McGraw-Hill, 1997. (Schaum's Outline Series).
- [IG-UnB]IG-UNB. Glossário geológico. Disponível em: <http://www.unb.br/ig/>.
- [Ismail M.A. & Selim 1986]ISMAIL M.A. & SELIM, S. Fuzzy c-means: Optimality of solutions and effective termination of the algorithm. *Pattern Recognition*, v. 19, n. 6, p. 481–485, 1986.
- [Jazwinski 1970]JAZWINSKI, A. H. *Stochastic Processes and Filtering Theory*. 1st. ed. [S.l.]: Academic Press, INC., 1970.

- [Ji Qiang & Haralick 1998]JI QIANG & HARALICK, R. M. Breakpoint detection using covariance propagation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, v. 20, n. 8, p. 845–851, August 1998.
- [Julier e Uhlmann 2004]JULIER, S.; UHLMANN, J. Unscented Filtering and Nonlinear Estimation. In: *Proceedings of IEEE*. [S.l.: s.n.], 2004. p. 401–422.
- [Kalman 1960]KALMAN, R. E. A new approach to linear filtering and prediction problems. *Transactions of the AMSE - Journal of Basic Engineering*, v. 82, n. Series D, p. 35–45, 1960.
- [Kushnir 1990]KUSHNIR, A. F. Statistically Optimal Event Detector Using Small Array Data. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Bulletin of the Seismological Society of America, v. 80, n. 6, p. 1934–1950, December 1990.
- [Leandro]LEANDRO. Caracterização de assinatura da chegada em traços sísmicos de refração sísmica profunda para modelagem por amplitude. Relatório referente à disciplina Estágio Supervisionado 1.
- [Leonard 2000]LEONARD, M. Comparison of Manual and Automatic Onset Time Picking. *Bulletin of the Seismological Society of America*, v. 90, n. 6, p. 1384–1390, December 2000.
- [Leonard e Kenett 1999]LEONARD, M.; KENETT, B. Multi-component Autoregressive Techniques for the Analysis of Seismograms. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, Elsevier, v. 113, n. 1-4, p. 247–263, June 1999.
- [Luenberger 1984]LUENBERGER, D. *Linear and Nonlinear Programming*. [S.l.]: Addison Wesley, 1984.
- [Maeda 1985]MAEDA, N. A Method for Reading and Checking Phase Times in Auto-Processing System of Seismic Wave Data. *Zisin - Journal of the Seismological Society of Japan*, v. 38, p. 365–379, 1985.
- [Malverino 2000]MALVERINO, A. A bayesian criterion for simplicity in inverse problem parametrization. *Geophysical Journal International*, n. 140, p. 267–285, 2000.
- [McGee 1967]MCGEE, D. Effect of advancing technology. In: \_\_\_\_\_. [S.l.]: Dept. of Interior, Washington, DC, 1967. cap. Geology, p. 9.
- [Mehra 1970]MEHRA, R. K. On the identification of variacnes and adaptive kalman filtering. *IEEE Transactions on Automatic Control*, v. 15, n. 2, p. 175–184, April 1970.
- [Melo 2005]MELO, S. V. de. *Razão de Poisson da crosta superior da região de Porangatu, Goiás, Província Tocantins: um estudo por refração sísmica*. Dissertação (Mestrado) — Universidade de Brasília, 2005.
- [Molotkov 1977]MOLOTKOV, V. C. . I. *Ray Methods in Seismology*. [S.l.]: University of Karlova Press, 1977.

- [Morita e H.Hamaguchi 1984]MORITA, Y.; H.HAMAGUCHI. Automatic Detection of Onset Time of Seismic Waves and its Confidence Interval Using Autoregressive Model Fitting. *Zisin - Journal of the Seismological Society of Japan*, v. 37, p. 281–293, 1984.
- [Mozorov 2004]MOZOROV, I. B. Null-space and statistical significance of first-arrival traveltimes inversion. *Geophysical Journal International*, n. 156, p. 549–554, 2004.
- [Nguyen et al. 2005]NGUYEN, V. et al. A comparison of line extraction algorithms using 2d laser rangefinder for indoor mobile robotics. In: *Proceedings of Conference on Intelligent Robots and Systems, IROS'2005*. [S.l.: s.n.], 2005.
- [Noriega e Pasupathy 1992]NORIEGA, G.; PASUPATHY, S. Application of kalman filtering to real-time preprocessing of geophysical data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. 30, n. 5, p. 897–910, September 1992.
- [Pollock 1999]POLLOCK, D. *A Handbook of Time-Series Analysis, Signal Processing and Dynamics*. [S.l.]: Academic Press, INC., 1999.
- [Saragiotis, Hadjileontiadis e Panas 1999]SARAGIOTIS, C.; HADJILEONTIADIS, L.; PANAS, S. M. A Higher-Order Statistics-based Phase Identification of Three-component Seismograms in a Redundant Wavelet Transformation Domain. *IEEE Workshop Higher-Order Statistics, Caesaria, Israel*, p. 396–399, June 1999.
- [Saragiotis, Hadjileontiadis e Panas 2000]SARAGIOTIS, C.; HADJILEONTIADIS, L.; PANAS, S. M. Automatic S-phase Arrival Determination of Seismic Signals Using Nonlinear Filtering and High-Order Statistics. In: *IGARRS*. [S.l.: s.n.], 2000. p. 292–294.
- [Saragiotis, Hadjileontiadis e Panas 2002]SARAGIOTIS, C.; HADJILEONTIADIS, L.; PANAS, S. M. Pai-s/k: a Robust Automatic Seismic P phase Arrival Identification Scheme. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, IEEE, v. 40, n. 6, p. 1395–1404, June 2002.
- [Saragiotis, Hadjileontiadis e Panas 2004]SARAGIOTIS, C.; HADJILEONTIADIS, L.; PANAS, S. M. Automatic P Phase Picking Using Maximum Kurtosis and  $\kappa$ -Statistics Criteria. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, v. 1, n. 3, p. 147–151, July 2004.
- [Shearer 1999]SHEARER, P. M. *Introduction to Seismology*. [S.l.]: Cambridge University Press, 1999.
- [Siadat et al. 1997]SIADAT, A. et al. An optimized segmentation method for a 2d laser-scanner applied to mobile robot navigation. In: *3rd IFAC Symposium on Intelligent Components and Instruments for Control Applications*. [S.l.: s.n.], 1997. v. 1, p. 153–158.
- [Sleeman e Eck 1999]SLEEMAN, R.; ECK, T. V. Robust Automatic P-phase Picking: An On-line Implementation of Broadband Seismogram Recordings. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, Elsevier, v. 113, n. 113, p. 265–275, June 1999.
- [Soares et al. 2006]Soares, J. E. et al. Seismic characteristics of central brazil crust and upper mantle: A deep seismic refraction study. *Journal of Geophysical Research (Solid Earth)*, v. 111, n. B10, p. 12302+–, December 2006.

- [Soares 2005]SOARES, J. E. P. *Estudos de refração sísmica profunda, função do receptor e gravimetria na Província Tocantins, Brasil central*. Tese (Doutorado) — Universidade de Brasília, June 2005.
- [Stein e Wyession 2003]STEIN, S.; WYSESSION, M. *An Introduction to Seismology, Earthquakes, and Earth Structure*. [S.l.]: Blackwell Publishing, 2003.
- [Takanami e Kitagawa 1993]TAKANAMI, T.; KITAGAWA, G. Multivariate Time-Series Models to Estimate the Arrival Times of S Waves. *Computers and Geosciences*, Pergamon Press, Inc, v. 19, n. 2, p. 295–301, February 1993.
- [Theodoridis e Koutroumbas 2003]THEODORIDIS, S.; KOUTROUMBAS, K. *Pattern Recognition*. 2. ed. San Diego, USA: Elsevier, 2003.
- [Ventura 2006]VENTURA, D. B. Estudos globais. Trabalho submetido para disciplina de pós-graduação do Instituto de Geociências. Dezembro 2006.
- [Zelt 1999]ZELT, C. A. Modelling strategies and model assessment for wide-angle seismic traveltime data. *Geophysical Journal International*, v. 1, n. 199, p. 183–204, 1999.
- [Zhang e Rowe 2003]ZHANG, C. T. H.; ROWE, C. Automatic P-Wave Detection and Picking with Multiscale Wavelet Analysis for Single-Component Recordings. *Bulletin of the Seismological Society of America*, v. 93, n. 5, p. 1904–1912, October 2003.

# ANEXOS

# I. TABELAS E FIGURAS

## CONSTRUÇÃO DOS MODELOS DE VELOCIDADE

### LEVANTAMENTOS DE REFRAÇÃO SÍSMICA

#### PROFUNDA

### I.1 Linha de Porangatu

Tabela I.1: Resultado da detecção das fases nos 68 registos do perfil direto e 56 do reverso para a linha sísmica de Porangatu. O tempo de chegada apontado pelo algoritmo  $t_{kf}$  é destacado em negrito.

Tiro Direto			Tiro Reverso		
Dist. (km)	Tempo real (s)	$t_{kf}$ (s)	Tempo real (s)	$t_{kf}$ (s)	Dist (km)
0,00	0,00	<b>0,00</b>	0,00	<b>0,00</b>	0
12,85	2,20	<b>2,04</b>	2,25	<b>1,06</b>	0,10
18,29	3,22	<b>3,11</b>	2,56	<b>2,72</b>	12,05
28,65	4,98	<b>4,93</b>	3,08	<b>2,65</b>	13,99
31,00	5,43	<b>5,39</b>	3,66	<b>3,11</b>	16,86
33,65	5,88	<b>5,84</b>	4,07	<b>3,89</b>	20,36
36,32	6,30	<b>6,28</b>	4,16	<b>4,25</b>	22,63
38,88	6,75	<b>6,73</b>	4,46	<b>4,24</b>	23,49
46,26	7,80	<b>7,78</b>	5,34	<b>4,65</b>	24,93
51,07	8,50	<b>8,48</b>	5,78	<b>5,81</b>	30,08
53,28	9,32	<b>9,27</b>	6,61	<b>5,89</b>	32,47
58,89	9,70	<b>9,68</b>	7,40	<b>7,10</b>	35,95
61,49	10,20	<b>10,22</b>	8,79	<b>7,53</b>	41,30
63,87	10,62	<b>10,62</b>	9,46	<b>8,97</b>	48,43
68,69	11,30	<b>11,32</b>	9,88	<b>9,82</b>	53,17
71,08	11,86	<b>11,88</b>	11,43	<b>11,36</b>	55,38
73,48	12,25	<b>12,26</b>	11,84	<b>11,83</b>	65,70
75,64	12,64	<b>12,64</b>	12,25	<b>12,24</b>	67,70
78,16	13,05	<b>13,02</b>	12,52	<b>12,93</b>	70,91
80,31	13,40	<b>13,39</b>	13,34	<b>13,41</b>	73,08
82,76	13,82	<b>13,77</b>	13,80	<b>13,82</b>	78,67
85,77	14,13	<b>14,13</b>	14,24	<b>14,44</b>	81,38
88,83	14,62	<b>14,60</b>	15,30	<b>15,56</b>	83,56
92,24	15,16	<b>15,17</b>	16,84	<b>15,73</b>	87,59
95,21	15,80	<b>15,80</b>	16,90	<b>16,77</b>	89,91
97,01	16,14	<b>16,17</b>	17,86	<b>18,43</b>	95,72
98,39	16,50	<b>16,52</b>	18,76	<b>18,69</b>	102,24

Continua na próxima página

Tabela I.1 – (continuação)

Tiro Direto			Tiro Reverso		
Dist. (km)	Tempo real (s)	$t_{kf}$ (s)	Tempo real (s)	$t_{kf}$ (s)	Dist (km)
99,48	16,80	<b>16,86</b>	19,50	<b>19,58</b>	107,47
102,49	17,22	<b>17,21</b>	21,15	<b>20,76</b>	110,04
104,89	17,50	<b>17,54</b>	22,80	<b>23,14</b>	114,83
117,31	19,56	<b>19,58</b>	23,55	<b>23,05</b>	132,98
125,04	20,56	<b>20,52</b>	23,58	<b>23,17</b>	133,97
127,78	20,92	<b>21,00</b>	23,41	<b>23,15</b>	135,97
130,42	21,38	<b>21,30</b>	-	<b>24,62</b>	138,72
133,30	21,90	<b>21,90</b>	24,85	<b>24,62</b>	144,03
135,42	22,26	<b>22,24</b>	25,12	<b>25,13</b>	151,65
136,38	22,86	<b>22,51</b>	27,65	<b>28,43</b>	166,86
144,37	23,43	<b>23,45</b>	28,16	<b>28,54</b>	169,93
146,68	23,70	<b>23,72</b>	28,41	<b>28,72</b>	171,65
152,16	24,44	<b>24,51</b>	28,61	<b>28,73</b>	173,44
154,55	24,80	<b>24,80</b>	29,54	<b>29,52</b>	178,89
162,08	26,16	<b>26,12</b>	29,90	<b>29,85</b>	182,51
167,30	26,91	<b>26,90</b>	30,25	<b>30,24</b>	185,79
171,08	27,22	<b>27,23</b>	34,05	<b>30,07</b>	189,10
173,17	27,59	<b>27,58</b>	31,00	<b>30,93</b>	191,51
176,08	28,28	<b>28,32</b>	32,14	<b>31,20</b>	193,92
178,97	28,76	<b>28,88</b>	32,43	<b>31,90</b>	200,49
181,31	29,12	<b>29,10</b>	32,93	<b>32,09</b>	202,62
185,34	30,25	<b>30,27</b>	33,23	<b>32,84</b>	207,19
187,51	30,30	<b>30,63</b>	33,58	<b>33,14</b>	209,64
190,26	31,26	<b>31,07</b>	35,00	<b>33,32</b>	211,71
193,41	31,34	<b>31,33</b>	36,13	<b>34,96</b>	224,00
195,87	31,43	<b>31,87</b>	36,43	<b>36,10</b>	231,64
198,01	32,40	<b>32,12</b>	36,67	<b>36,10</b>	234,17
201,25	32,84	<b>32,43</b>	40,40	<b>39,40</b>	236,53
203,20	32,30	<b>32,82</b>	40,60	<b>40,23</b>	264,99
208,61	33,76	<b>33,26</b>	42,06	<b>42,10</b>	275,59
227,73	35,54	<b>35,78</b>	-	-	-
232,99	36,40	<b>36,42</b>	-	-	-
236,60	36,51	<b>36,64</b>	-	-	-
239,20	37,54	<b>37,37</b>	-	-	-
244,01	38,54	<b>38,04</b>	-	-	-
245,40	37,80	<b>38,18</b>	-	-	-
246,51	38,51	<b>38,30</b>	-	-	-
249,08	38,54	<b>38,42</b>	-	-	-
252,47	39,54	<b>39,05</b>	-	-	-
258,89	39,40	<b>39,38</b>	-	-	-
261,60	39,51	<b>39,55</b>	-	-	-
278,27	42,54	<b>42,29</b>	-	-	-

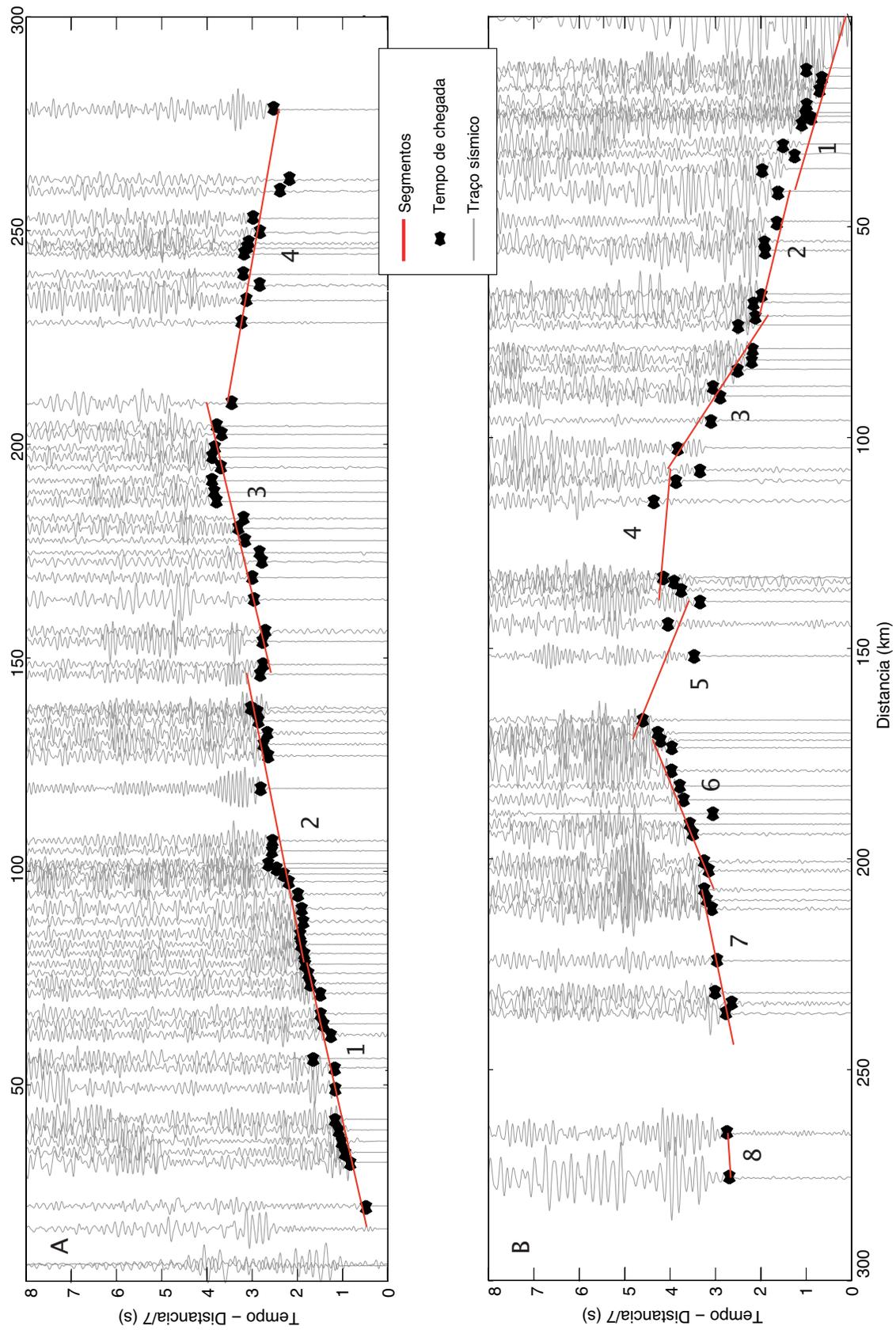


Figura I.1: Extração de retas por SMF para os perfis direto (A) e reverso (B) no levantamento de Porangatu. Os segmentos (linhas em vermelho) foram numerados de 1 a 4 no perfil direto, e 1 a 8 no reverso. Para ambos os tiros, o parâmetro de dispersão utilizado foi de  $\delta_{max} = 15$ . O sismograma foi reduzido em 7 km/s.

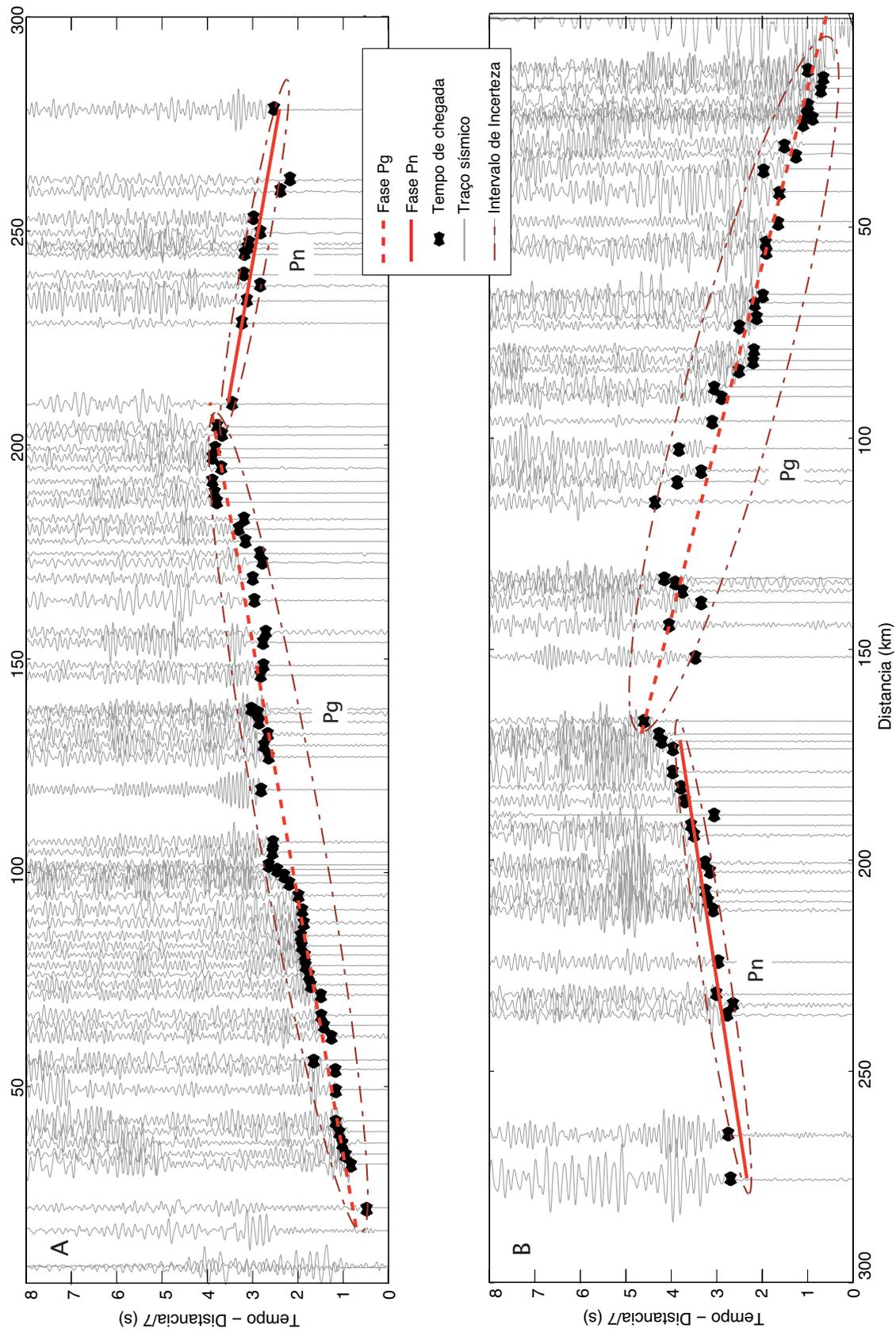


Figura I.2: Resultado da classificação dos segmentos em grupos de fase Pg e Pn nos tiros direto (A) e reverso (B) do levantamento de Porangatu. As linhas tracejadas em vermelho representam as fases Pg. A chegada da Pn é representada pela linha sólida em vermelho. As elipses ao redor dos segmentos representam os intervalos de confiança calculado por propagação de incertezas. As linhas tracejadas em cinza representam o traço sísmico, reduzido em 7 km/s.

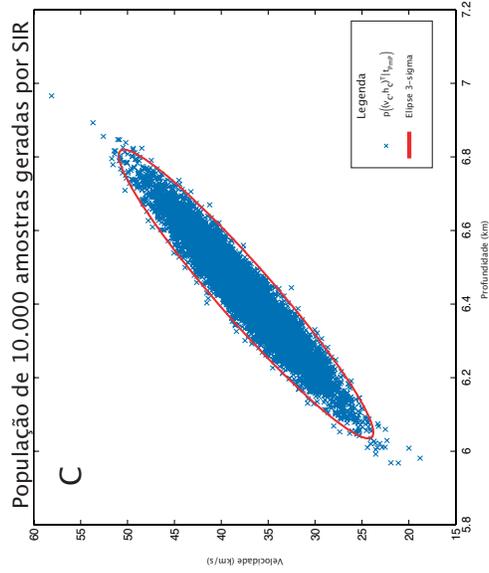
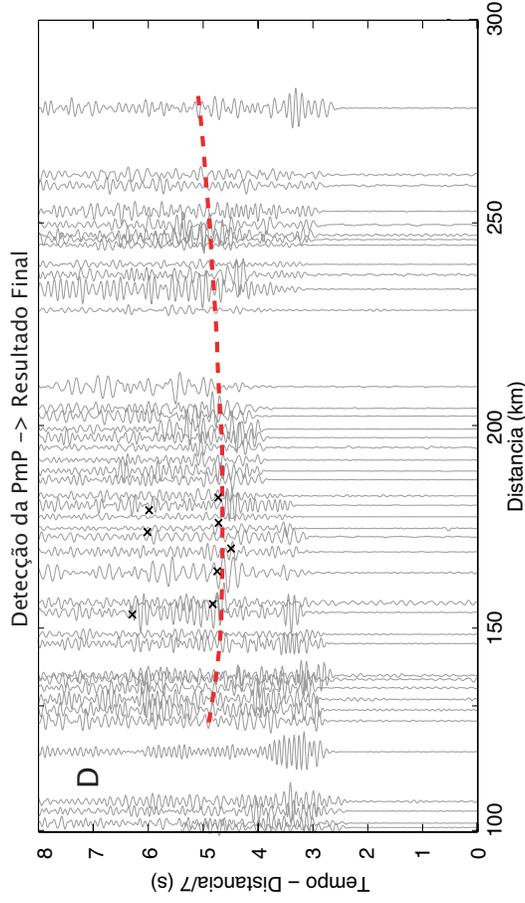
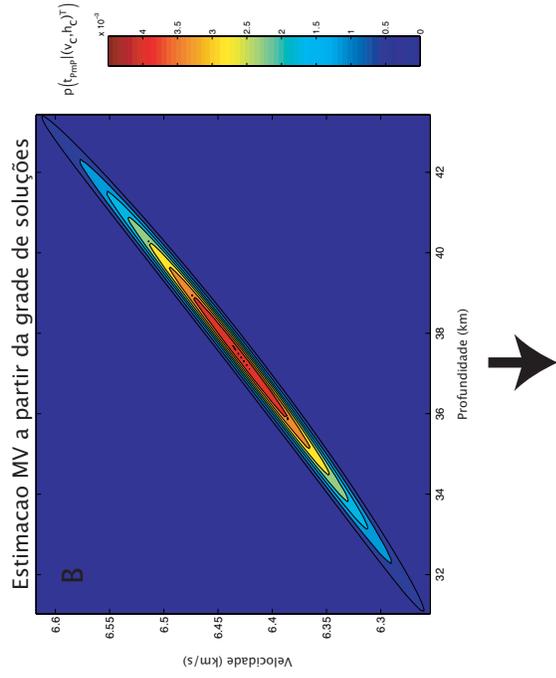
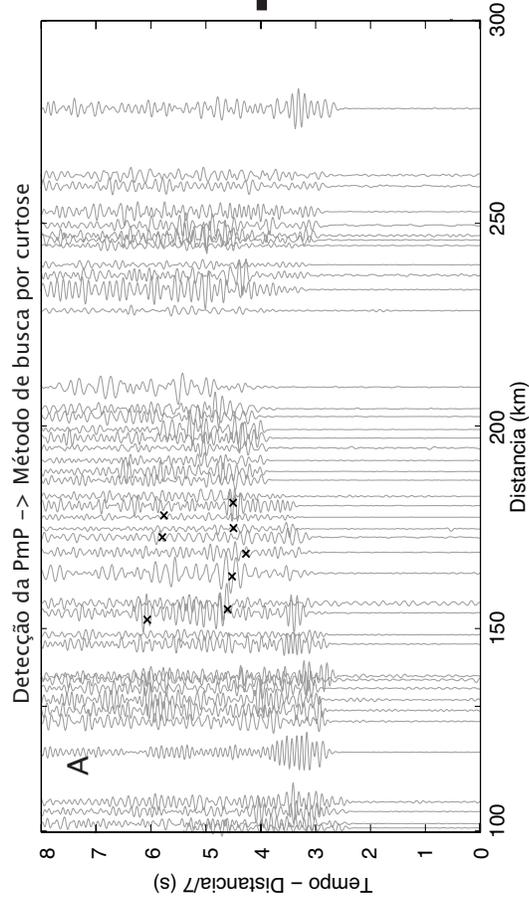


Figura I.3: Processo de estimacão da velocidade de propagao e espessura média da crosta no tiro direto do levantamento de Porangatu. Todo método consiste na (A) deteco dos prováveis tempos de chegada da PmP, (B) estimacão inicial por meio de estimacão dos parâmetros pelo máximo da verossimilhança, (C) correo da discretizao utilizando SIR, e (D) com os parâmetros estimados, estabelecer no sismograma o comportamento espacial da PmP.

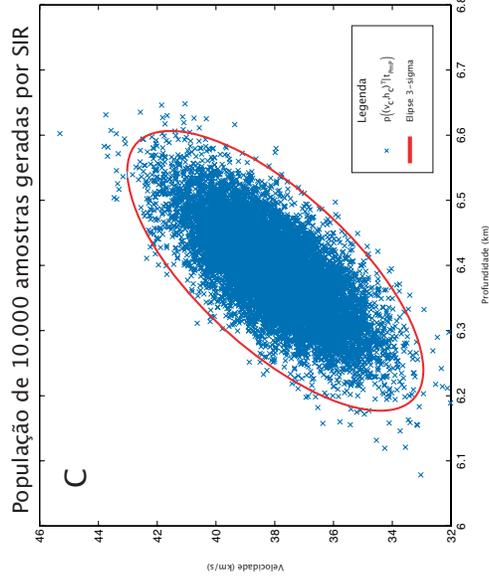
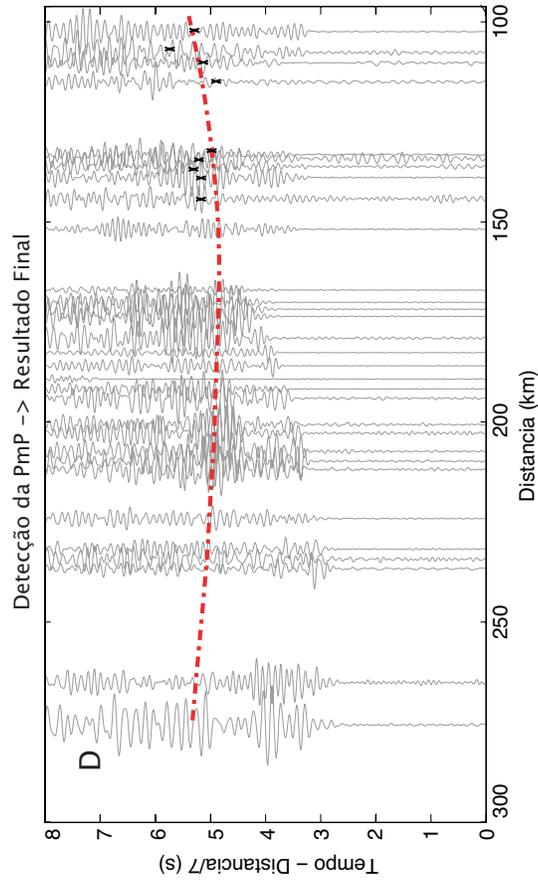
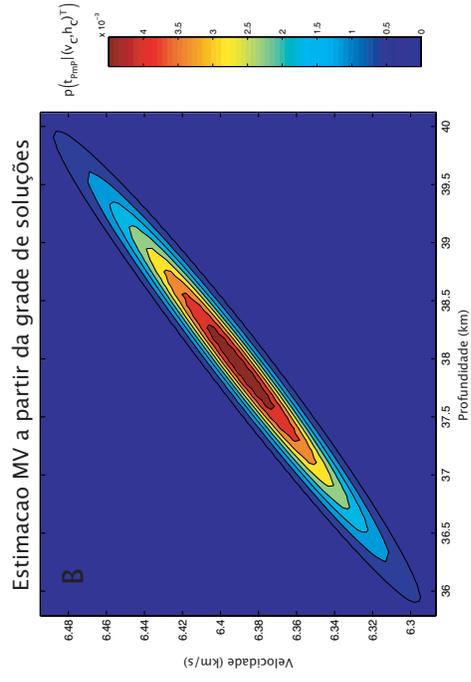
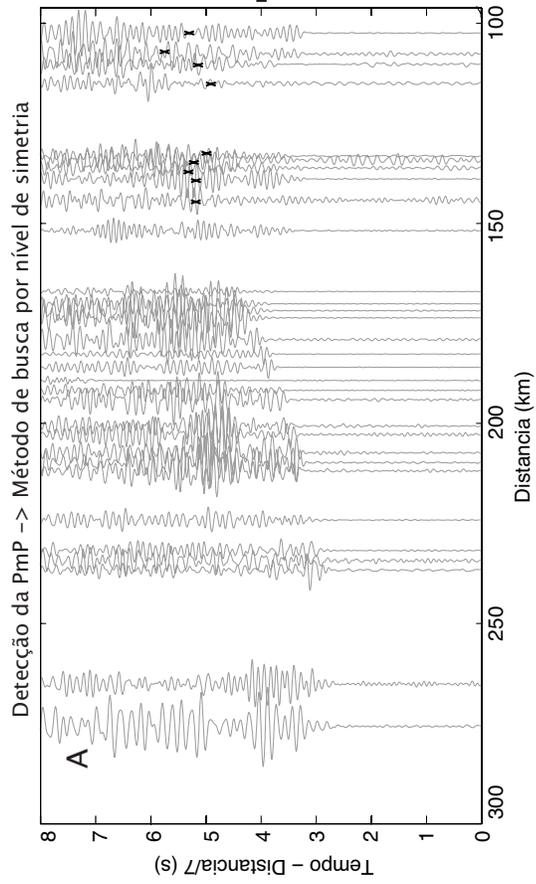


Figura I.4: Processo de estimação da velocidade de propagação e espessura média da crosta no tiro reverso do levantamento de Porangatu. Todo método consiste na (A) detecção dos prováveis tempos de chegada da PmP, (B) estimação inicial por meio de estimação dos parâmetros pelo máximo da verossimilhança, (C) correção da discretização utilizando SIR, e (D) com os parâmetros estimados, estabelecer no sismograma o comportamento espacial da PmP.

## I.2 Linha de Cavalcante

Tabela I.2: Resultado da detecção das fases para os registros do levantamento direto e reverso de Cavalcante. Os valores em destaque ( $t_{kf}$ ) representam os tempos de chegada detectados pelo algoritmo.

Tiro Direto			Tiro Reverso		
Dist. (km)	Tempo real (s)	$t_{kf}$ (s)	Tempo real (s)	$t_{kf}$ (s)	Dist (km)
15,93	0,00	<b>0,00</b>	0,00	<b>0,00</b>	36
30,31	1,24	<b>1,28</b>	0,25	<b>0,23</b>	0,25
33,22	1,74	<b>1,65</b>	0,98	<b>0,98</b>	1,86
35,9	2,05	<b>2,01</b>	1,94	<b>1,94</b>	4,88
42,94	3,55	<b>3,51</b>	3,24	<b>3,30</b>	10,37
45,2	4,05	<b>4,04</b>	4,20	<b>4,16</b>	17,62
49,04	4,50	<b>4,62</b>	5,08	<b>5,10</b>	23,17
47,65	4,30	<b>4,53</b>	5,85	<b>5,90</b>	28,88
50,22	4,90	<b>4,85</b>	6,38	<b>6,41</b>	31,81
52,07	5,05	<b>5,05</b>	7,20	<b>7,93</b>	36,65
54,95	5,55	<b>5,63</b>	8,13	<b>8,63</b>	42,77
59,59	6,24	<b>6,25</b>	8,45	<b>8,56</b>	46,77
61,48	6,60	<b>6,68</b>	9,53	<b>9,94</b>	49,43
63,77	6,90	<b>6,91</b>	11,8	<b>11,72</b>	62,01
65,01	7,20	<b>7,23</b>	12,20	<b>14,07</b>	69,56
69,93	8,05	<b>8,21</b>	14,64	<b>14,43</b>	75,89
84,83	10,30	<b>10,42</b>	15,60	<b>14,76</b>	83,76
86,92	10,20	<b>10,63</b>	16,30	<b>16,03</b>	86,12
88,99	11,15	<b>11,15</b>	17,64	<b>16,03</b>	88,95
94,18	11,90	<b>12,18</b>	17,99	<b>17,89</b>	91,46
103,57	13,92	<b>14,76</b>	21,60	<b>20,60</b>	105,89
110,13	14,60	<b>15,01</b>	22,44	<b>21,65</b>	121,44
112,03	14,96	<b>15,16</b>	24,12	<b>23,49</b>	126,13
115,0	15,54	<b>15,91</b>	22,58	<b>22,49</b>	131,71
117,12	15,80	<b>16,08</b>	24,28	<b>24,25</b>	134,32
122,18	16,64	<b>16,89</b>	-	<b>24,25</b>	135,89
124,46	16,90	<b>17,04</b>	28,41	<b>27,53</b>	149,89
126,33	17,20	<b>17,91</b>	29,83	<b>30,03</b>	166,26
128,95	17,72	<b>18,02</b>	31,10	<b>31,00</b>	170,14
131,17	18,10	<b>18,51</b>	31,61	<b>31,62</b>	176,28
134,40	18,56	<b>18,53</b>	32,07	<b>31,82</b>	189,07
139,80	19,56	<b>19,62</b>	31,96	<b>31,55</b>	189,91
143,53	20,12	<b>20,07</b>	32,10	<b>32,09</b>	191,14
148,36	20,48	<b>20,97</b>	32,65	<b>32,40</b>	191,95
162,56	23,30	<b>23,40</b>	-	<b>33,01</b>	192,45
167,59	24,26	<b>24,26</b>	34,56	<b>34,02</b>	194,18
172,69	24,86	<b>24,97</b>	35,02	<b>35,75</b>	197,30
177,92	24,43	<b>24,36</b>	38,20	<b>38,70</b>	204,26

Continua na próxima página

Tabela I.2 – (continuação)

Tiro Direto			Tiro Reverso		
Dist. (km)	Tempo real (s)	$t_{kf}$ (s)	Tempo real (s)	$t_{kf}$ (s)	Dist (km)
183,16	26,40	<b>26,50</b>	39,00	<b>39,06</b>	244,62
185,76	26,84	<b>27,04</b>	40,05	<b>39,33</b>	248,14
189,94	27,30	<b>27,40</b>	41,31	<b>42,33</b>	271,25
192,64	27,76	<b>27,86</b>	42,00	<b>42,45</b>	274,22
212,07	30,25	<b>30,25</b>	42,20	<b>42,65</b>	276,22
222,22	32,54	<b>31,89</b>		-	
225,04	32,80	<b>32,00</b>		-	
227,87	31,51	<b>32,09</b>		-	
234,42	32,54	<b>32,25</b>		-	
238,95	35,00	<b>32,59</b>		-	
245,58	34,00	<b>34,39</b>		-	
252,30	35,25	<b>35,45</b>		-	
264,43	36,35	<b>36,45</b>		-	
272,67	37,45	<b>37,62</b>		-	
277,34	38,67	<b>38,00</b>		-	
280,09	38,55	<b>38,90</b>		-	
285,47	39,82	<b>39,52</b>		-	
290,71	41,12	<b>40,12</b>		-	
297,49	43,64	<b>40,72</b>		-	
305,28	41,53	<b>41,53</b>		-	

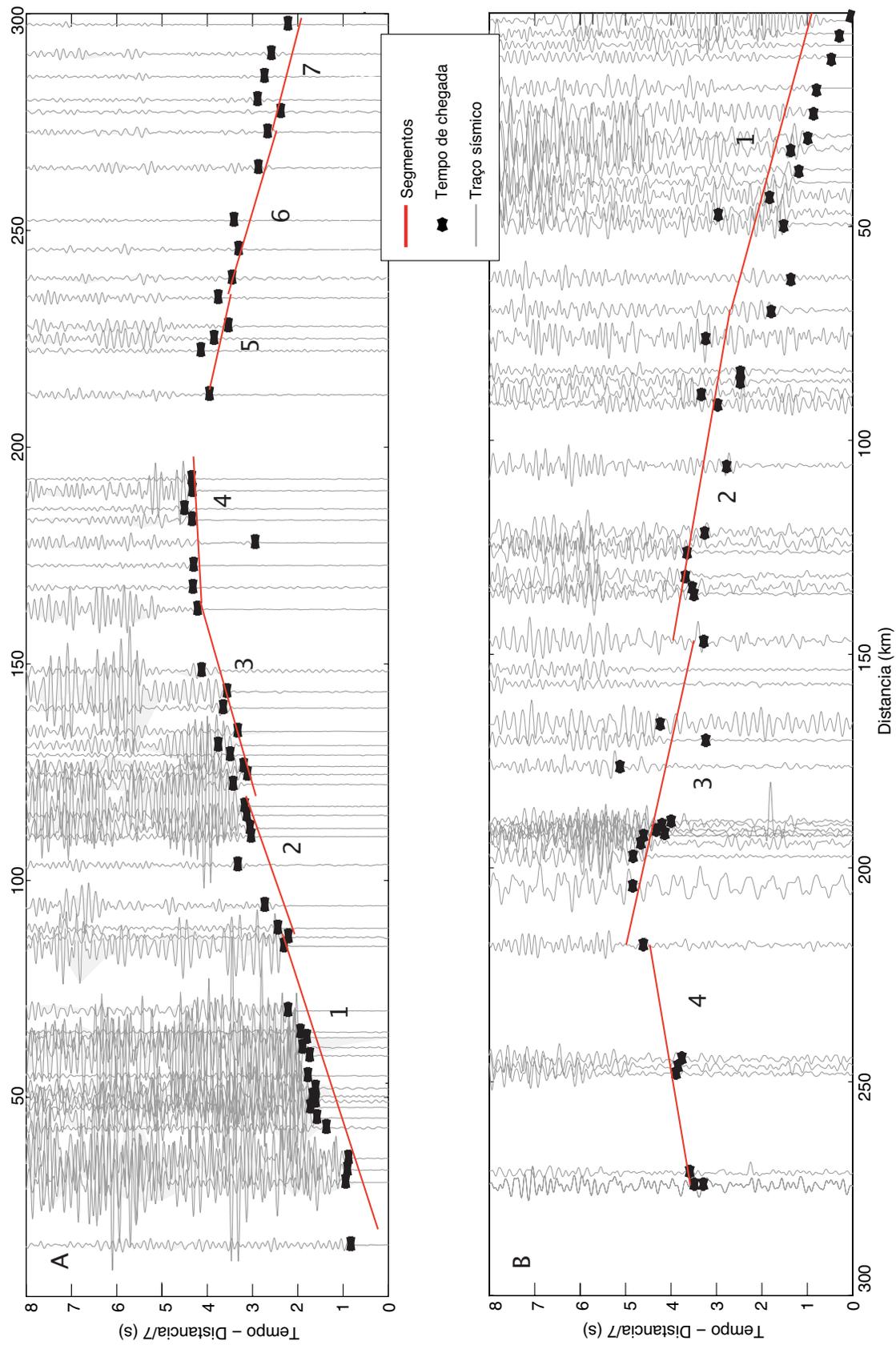


Figura I.5: Extração de retas por SMF para os perfis direto (A) e reverso (B) no levantamento de Cavalcante. Os segmentos (linhas em vermelho) foram numerados de 1 a 7 no perfil direto, e 1 a 4 no reverso. O parâmetro de dispersão utilizado no tiro direto foi  $\delta_{max} = 15$ , e  $\delta_{max} = 30$  no tiro reverso. O sismograma foi reduzido em 7 km/s.

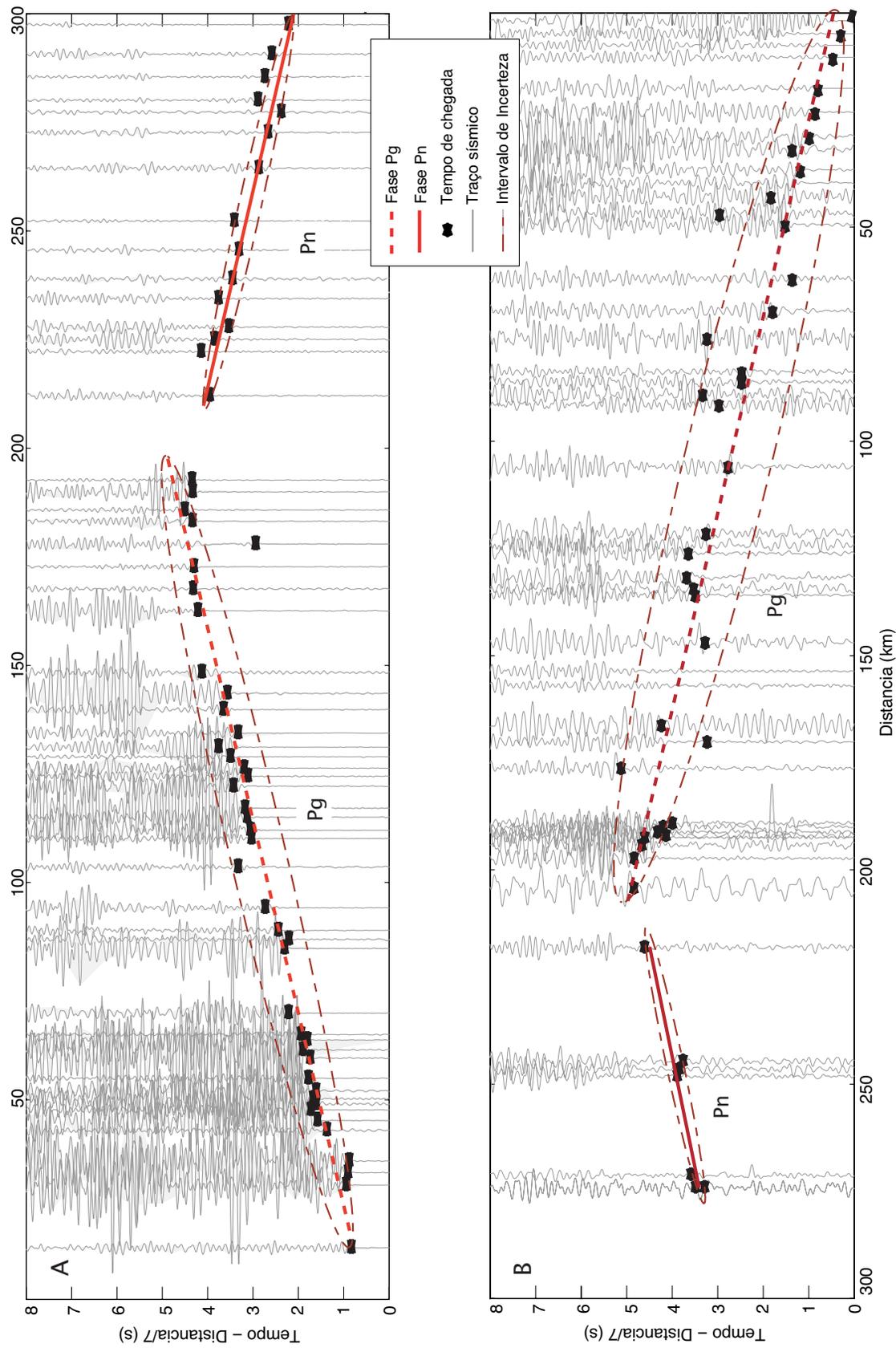


Figura I.6: Resultado da classificação dos segmentos em grupos de fase Pg e Pn nos tiros direto (A) e reverso (B) do levantamento de Cavalcante. As linhas tracejadas em vermelho representam as fases Pg. A chegada da Pn é representada pela linha sólida em vermelho. As elipses ao redor dos segmentos representam os intervalos de confiança calculado por propagação de incertezas. As linhas tracejadas em cinza representam o traço sísmico, reduzido em 7 km/s.

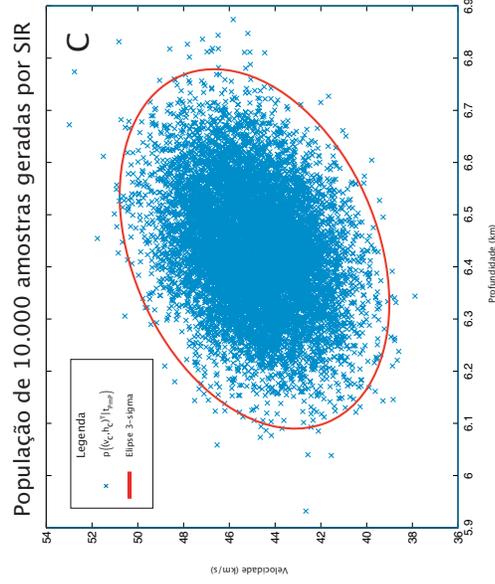
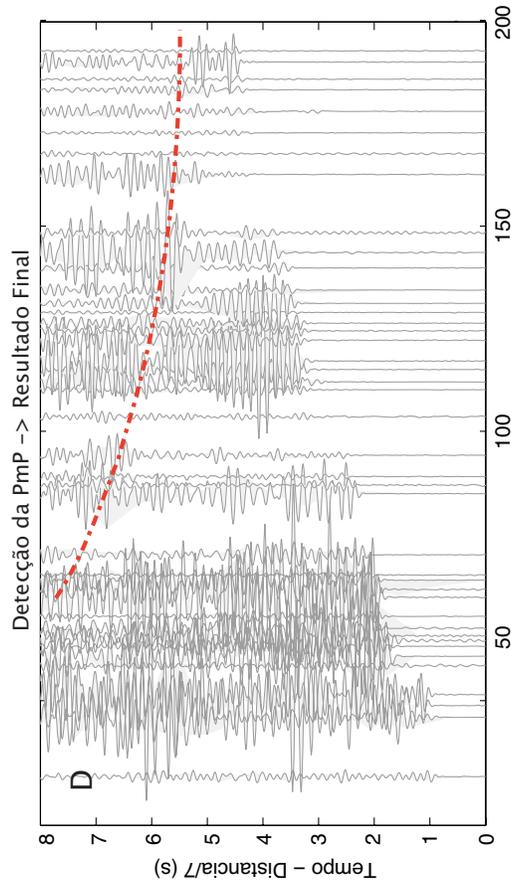
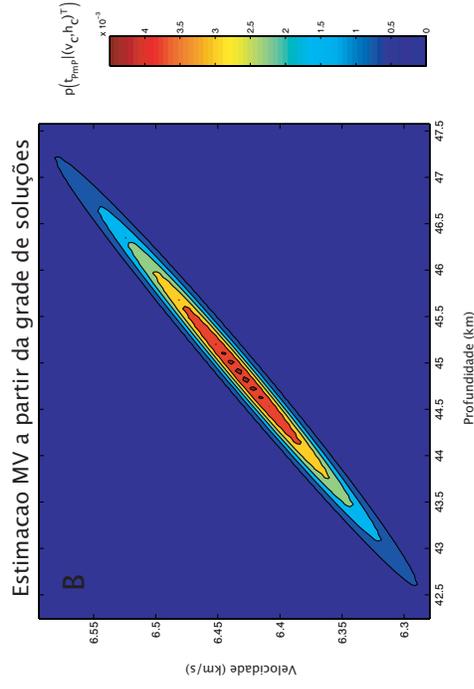
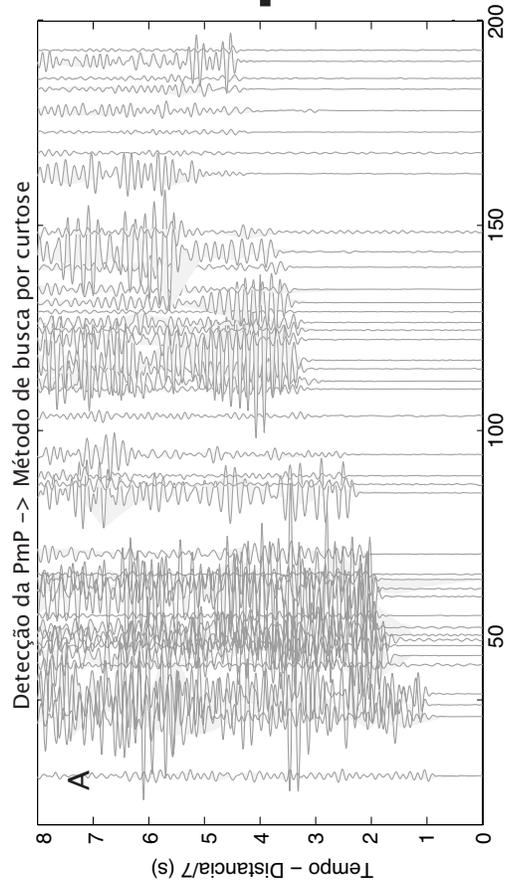


Figura I.7: Processo de estimação da velocidade de propagação e espessura média da crosta no tiro direto do levantamento de Cavalcante. Todo método consiste na (A) detecção dos prováveis tempos de chegada da PmP, (B) estimação inicial por meio de estimação dos parâmetros pelo máximo da verossimilhança, (C) correção da discretização utilizando SIR, e (D) com os parâmetros estimados, estabelecer no sismograma o comportamento espacial da PmP.

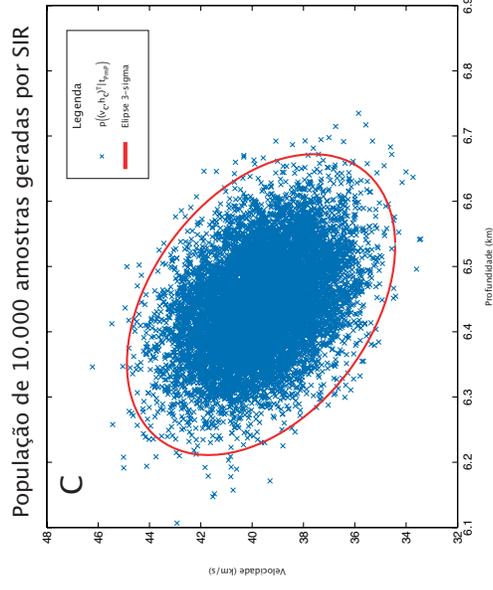
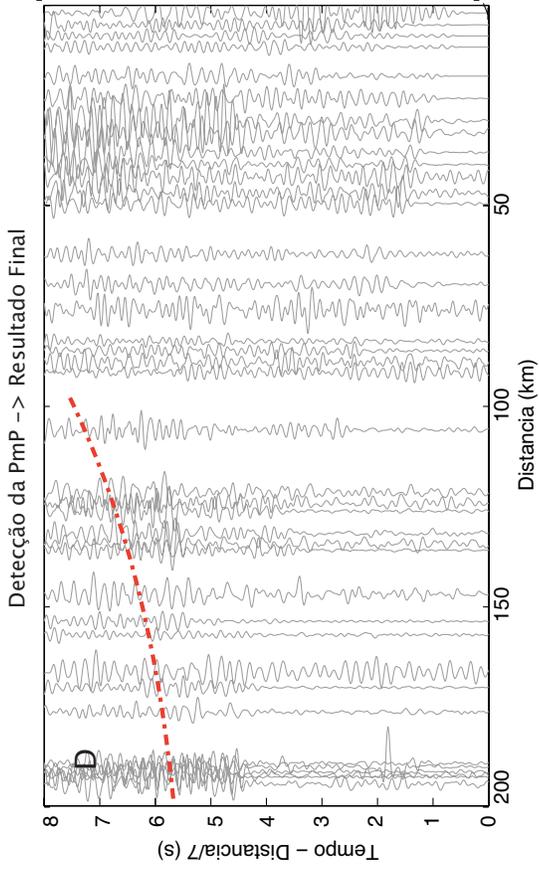
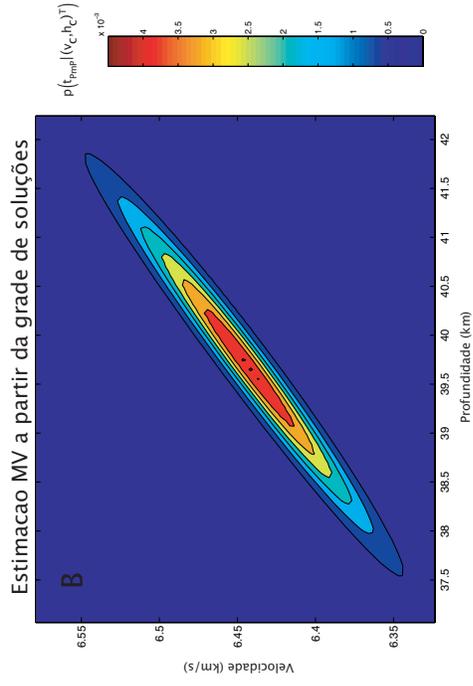
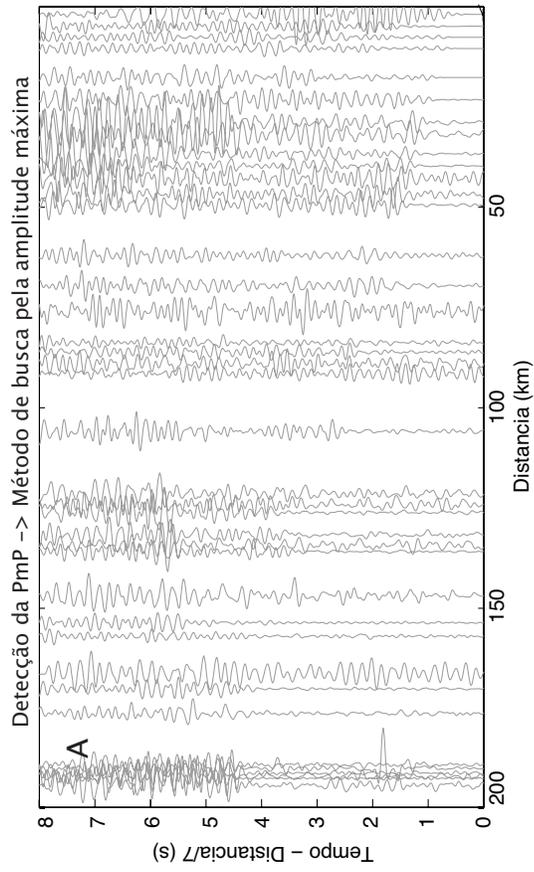


Figura I.8: Processo de estimação da velocidade de propagação e espessura média do levantamento de Cavalcante. Todo método consiste na (A) detecção dos prováveis tempos de chegada da PmP, (B) estimação inicial por meio de estimação dos parâmetros pelo máximo da verossimilhança, (C) correção da discretização utilizando SIR, e (D) com os parâmetros estimados, estabelecer no sismograma o comportamento espacial da PmP.

## II. CÓDIGO MATLAB

Os algoritmos utilizados para processamento dos registros de refração sísmica profunda foram desenvolvidos em módulos, compostos por funções e procedimentos responsáveis por uma ou mais tarefas dentro do processo de construção do modelo de velocidades. A Figura II.1 mostra a organização dos códigos sob forma de árvore de diretórios e arquivos.

Este anexo apresenta os arquivos com extensão *.m* onde estão os códigos utilizados para geração do modelo de velocidades.

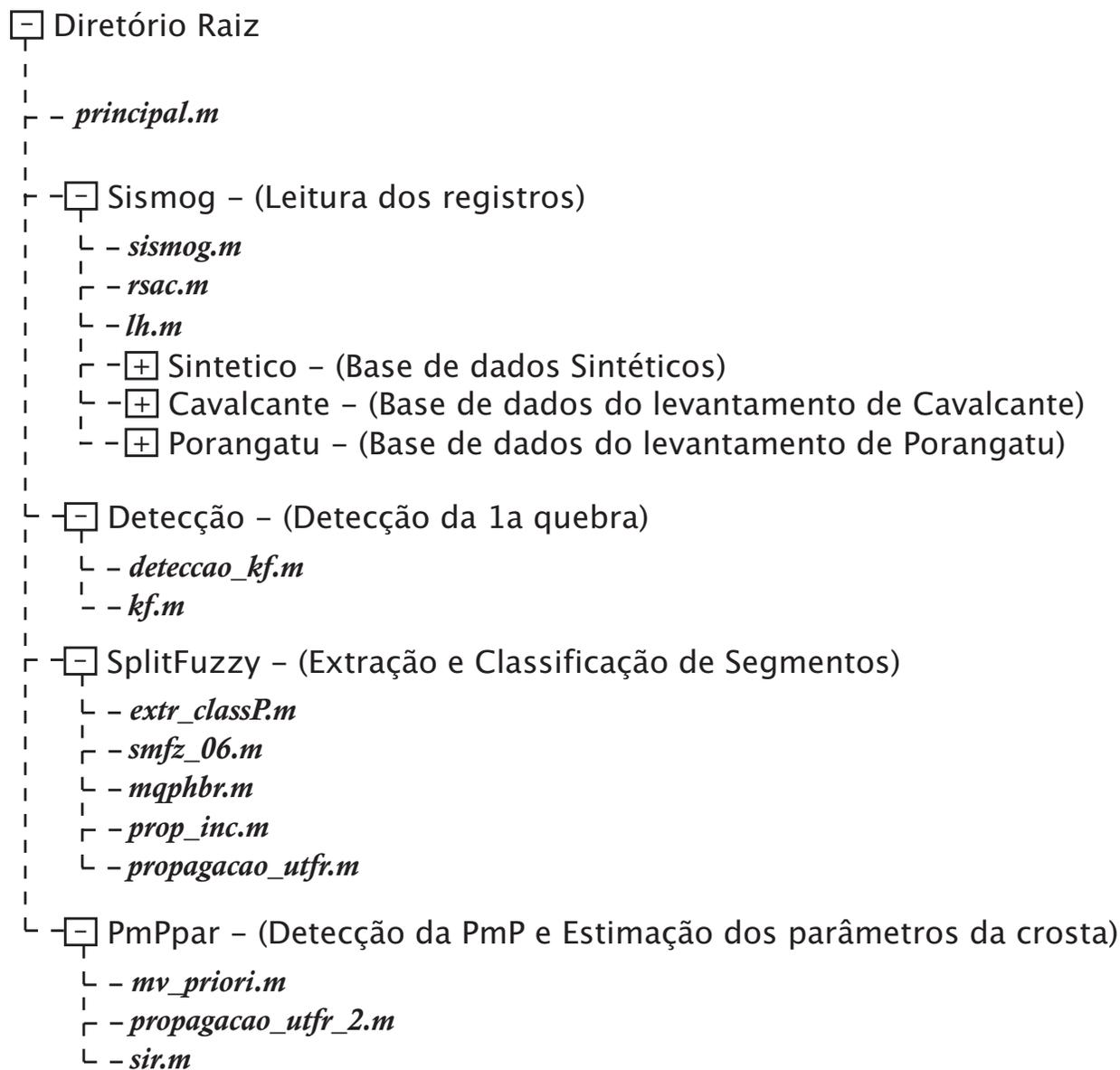


Figura II.1: Diagrama em forma de árvore que mostra a organização do código MATLAB. Cada subdiretório possui um número de chave, e somente pode-se acessar suas áreas para consulta aberta da área.

## II.1 principal.m

```
1 %                                     %%%%
2 %           Rotina principal para construcao %%%%
3 %           de modelos de velocidade em refracao %%%%
4 %           sismica profunda %%%%
5 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
6
7 % Limpa ambiente Matlab
8 clear all;
9 close all;
10
11
12 % PARAMETROS INICIAIS %%%
13
14 veloc_red = 7; %Velocidade de Reducao adotada no algoritmo
15
16 ext_dados='\\*.sac?'; % Extensao do arquivo dados de sismologia em SAC (Seismic
17 % Analysis Code)
18
19 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
20 % Selecao da base ddo dados para processamento %%%
21 % e ambiencia tectonica %%%
22 % %%%
23 % Opcoes de Base -> -Sintetico; -Cavalcante; -Porangatu %%%
24 % %%%
25 % Direcao do tiro -> -Direto; -Reverso %%%
26 % %%%
27 % Ambiente tectonico -> geral, orogeno, plataforma, %%%
28 % arco, rift, crosta estirada %%%
29 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
30 dados_entrada = 'porangatu';
31 tipo_tiro = 'direto';
32 ambiente_geologico='geral';
33
34
35 % Seleciona a base dos dados %%%
36 switch dados_entrada
37     case 'sintetico'
38         dir_orig_dados=['sint\\',tipo_tiro, '\\']; %Caminho de leitura dos arquivos
39         ext_linha = 300; % Extensao da linha (km)
40         pre_proc=0; %Flag de pre-processamento
41         inc_mode = 0.001; %Incerteza do modelo - Q
42         inc_mode2 = inc_mode/100; %Incerteza do modelo - Q1
43         inc_med = 3e-1; %Incerteza da medicao - R
44         Δ_max =11; %Parametro dispersao SMF -Δ_max
45         scale = 0.2; %Fator de escala sismograma
46         sigmae = 0.05; %Residuo de tempo - PmP
47         metodo='MAX_VAL'; %Metodo de busca - PmP
48
49     % Parametros de referencia %%%
```

```

50     vel_crosta_org = 6.45;
51     prof_crosta_org = 37;
52     vel_manto_org = 8;
53
54     case 'cavalcante'
55         dir_orig_dados=['cavalc\'',tipo_tiro,'\']; %Caminho de leitura dos arquivos
56         ext_linha = 300; % Extensao da linha (km)
57         pre_proc=1; %Flag de pre-processamento
58         if strcmp(tipo_tiro,'direto')==1, %Seleciona direcao do tiro
59             inc_mode = 8e-7; %Incerteza do modelo - Q
60             inc_mode2 = 1e-8; %Incerteza do modelo - Q1
61             inc_med = 5e-6; %Incerteza da medicao - R
62             Δ_max =15; %Parametro dispersao - SMF - Δ_max
63             scale = 0.5; %Fator de escala sismograma
64             sigmae = 0.1; %Residuo de tempo - PmP
65
66             % Parametros de referencia %%%
67             vel_crosta_org = 6.43;
68             prof_crosta_org = 43;
69             vel_manto_org = 8.28;
70         else
71             inc_mode = 9e-7; %Incerteza do modelo - Q
72             inc_mode2 = 1e-9; %Incerteza do modelo - Q1
73             inc_med = 8e-5; %Incerteza da medicao - R
74             Δ_max =30; %Parametro dispersao - SMF - Δ_max
75             scale = 0.5; %Fator de escala sismograma
76             sigmae = 0.1; %Residuo de tempo - PmP
77
78             % Parametros de referencia %%%
79             vel_crosta_org = 6.45;
80             prof_crosta_org = 40;
81             vel_manto_org = 7.99;
82         end
83         metodo='KURT'; %Metodo de busca - PmP
84
85     case 'porangatu'
86         dir_orig_dados=['porangatu\'',tipo_tiro,'\'];
87         ext_linha = 300; % Extensao da linha (km)
88         pre_proc=1; %Flag de pre-processamento
89         if strcmp(tipo_tiro,'direto')==1,
90             inc_mode = 0.000001; %Incerteza do modelo - Q
91             inc_mode2 = 0.00000001; %Incerteza do modelo - Q1
92             inc_med = 1e-7; %Incerteza da medicao - R
93             Δ_max =25; %Parametro dispersao - SMF - Δ_max
94             scale = 5; %Fator de escala sismograma
95             sigmae = 0.1; %Residuo de tempo - PmP
96
97             % Parametros de referencia %%%
98             vel_crosta_org = 6.5;
99             prof_crosta_org = 37;
100            vel_manto_org = 8.06;
101         else
102             inc_mode = 0.000001; %Incerteza do modelo - Q

```

```

103         inc_mode2 = 0.00000001;           %Incerteza do modelo - Q1
104         inc_med  = 3e-7;                 %Incerteza da medicaao - R
105         Δ_max =15;                       %Parametro dispersao - SMF - Δ_max
106         scale = 0.5;                     %Fator de escala sismograma
107         sigmae = 0.1;                    %Residuo de tempo - PmP
108
109         % Parametros de referencia %%
110         vel_crosta_org = 6.46;
111         prof_crosta_org = 39;
112         vel_manto_org = 8.05;
113     end
114     metodo='MAX_VAL';                    %Metodo de busca - PmP
115 end
116
117
118 %
119 % Determinacao das incertezas a priori para cada ambiente tectonico
120 % considerando as observacoes feitas por Christenssen e Mooney para
121 % levantamentos de refracao sismica profunda
122 %
123 switch ambiente_geologico
124     case 'geral'
125         v_min=6.45-0.21; v_max=6.45+0.21; %Intervalo para vel media da crosta
126         h_min=41-6.2;   h_max=41+6.2;    %Intervalo para espess da crosta
127     case 'orogeno'
128         v_min=6.39-0.25; v_max=6.39+0.25; %Intervalo para vel media da crosta
129         h_min=46.3-9.5;  h_max=46.3+9.5;  %Intervalo para espess da crosta
130     case 'plataforma'
131         v_min=6.42-0.20; v_max=6.42+0.20; %Intervalo para vel media da crosta
132         h_min=41.5-5.8;  h_max=41.5+5.8;  %Intervalo para espess da crosta
133     case 'arco'
134         v_min=6.44-0.25; v_max=6.44+0.25; %Intervalo para vel media da crosta
135         h_min=38.7-9.6;  h_max=38.7+9.6;  %Intervalo para espess da crosta
136     case 'rift'
137         v_min=6.36-0.23; v_max=6.36+0.23; %Intervalo para vel media da crosta
138         h_min=36.2-7.9;  h_max=36.2+7.9;  %Intervalo para espessda crosta
139     case 'crost_est'
140         v_min=6.21-0.22; v_max=6.21+0.22; %Intervalo para vel media da crosta
141         h_min=30.5-5.3;  h_max=30.5+5.3;  %Intervalo para espess da crosta
142 end
143
144
145 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
146 %% Rotina de leitura dos sismogramas em SAC
147 %%
148 %% Entrada: caminho dos arquivos
149 %%
150 %% Saida: tracos: matriz MxN
151 %%     dist: vetor distancia do ponto de tiro
152 %%     Δ: periodo de amostragem (seg)
153 %%     nro_trac: vetor Mx1 contendo o nro de sensores
154 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
155 cd sismog;      %Diretorio de geracao sismograma

```

```

156
157 [tracos, dist, Δ, nro_trac] = sismog(dir_orig_dados); %Leitura dos sismogramas
158
159 %% TRATAMENTO DOS TRACOS PARA UTILIZACAO NO ALGORITMO %%
160
161 %% Inversao do traco para o tiro reverso %%
162 if(strcmp(tipo_tiro,'direto')==0)
163     dist = abs(dist(length(dist):-1:1));
164     tracos = tracos(:,length(tracos(1,:)):-1:1);
165 end
166
167 cd ..;
168
169 %% PRE-PROCESSAMENTO DOS DADOS %%
170
171 if(pre_proc == 1)
172     [B,A] = butter(4,[0.012 .1]); % Filtro butterworth de 4a ordem
173     for i=1:length(dist); % Aplica filtro fase zero nos tracos
174         tracos(:,i) = filtfilt(B, A, tracos(:,i)./abs(max(tracos(:,i))));
175         tracos(:,i) = tracos(:,i) - mean(tracos(:,i));
176     end % O traco eh normalizado sem offset
177 end
178
179 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
180 %% Rotina de deteccao de fase com filtro de Kalman
181 %%
182 %% Entrada: tracos - registros
183 %%          Δ - periodo de amostragem
184 %%          nro_trac - numero de registros
185 %%          inc_mode, inc_mode2 - incerteza do modelo
186 %%          inc_med - incerteza de medicao
187 %%
188 %% Saida: vetor Mx1 com o tempo de chegada da fase
189 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
190 cd deteccao;
191
192 t_chegada = deteccao_kf(tracos, Δ, nro_trac, inc_mode, inc_mode2, inc_med);
193
194 %% RETIRA OFFSET DE 4 SEGUNDOS INSERIDOS NOS DADOS DE CAVALCANTE %%
195 if(strcmp(dados_entrada,'cavalcante') == 1)
196     temp = tracos;
197     clear tracos;
198     tracos = temp(ceil(4/Δ):length(temp),:); %Retira o tempo extra
199     clear temp;
200     t_chegada=t_chegada-4; %Retira do tempo de chegada
201 end
202
203 cd ..;
204
205 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
206 %% Rotina de extracao e classificacao de segmentos de reta
207 %%
208 %% Entrada: dist - vetor de distancia do ponto de tiro

```

```

209 %%          t_chegada - vetor de tempo de chegada da fase
210 %%          Δ_max - fator de dispersao maximo
211 %%
212 %% Saida:   linhaP - Kernel das linhas classificadas
213 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
214 cd SplitFuzzy;
215
216 linhaP = extr_classP(dist, t_chegada, Δ_max);
217
218 cd ..;
219
220 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
221 %% Rotina de deteccao da PmP e determinacao dos parametros medios
222 %% da estrutura da crosta
223 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
224 cd PmPpar;
225
226 %% DETERMINACAO DA VELOCIDADE DE PROPAGACAO NA MOHO - v_m, var_vm %%
227 v_m = cos(linhaP(2).alpha)/sin(linhaP(2).alpha);
228 [dummy var_vm] = propagacao_utfr_2(linhaP(2).alpha, linhaP(2).Cra(2,2));
229
230 %% DETERMINACAO DA VELOCIDADE DE PROPAGACAO E ESPESSURA DA CROSTA %%
231
232 %% Obtencao dos parametros pela grade e max verossimilhanca %%
233 [v_mv, h_mv, Vet_pmp, P_priori] = mv_priori(tracos, linhaP, dist, Δ,...
234             sigmae, scale, metodo,v_min,...
235             v_max, h_min, h_max);
236
237 %% Reducao do efeito da discretizacao por Sampling Importance Resampling (SIR) %%
238 [dist_vel, dist_prof] = sir(Vet_pmp, [v_mv;h_mv], P_priori, 10000, sigmae);
239
240 %% Determinacao dos parametros finais %%
241 v_sir = mean(dist_vel);           %% Velocidade na crosta (km/s)
242 h_sir = mean(dist_prof);         %% Espessura da crosta (km)
243 std_v = sqrt(var(dist_vel));     %% Desvio padrao da velocidade (km/s)
244 std_h = sqrt(var(dist_prof));    %% Desvio padrao da espessura (km)
245
246 cd ..;
247
248 %%% RESULTADOS GRAFICOS %%%
249
250 % Sismograma composto com as detectcoes de primeira quebra %
251 figure(1);
252 for tiro_n=1:length(dist),       % Mostra o registro
253     vel_red = dist(tiro_n)/veloc_red; % Calcula o valor de reducao
254     plot(scale*tracos(:,tiro_n)+dist(tiro_n),...
255          ((1:length(tracos(:,tiro_n))))*Δ-vel_red);
256     plot(dist(tiro_n), t_chegada(tiro_n)-vel_red,'xr'); % Mostra tempo chegada
257     hold on;
258 end
259 if veloc_red < Inf, % Determinacao do intervalo dos eixos
260     axis([4,ext_linha,0,8]);
261 end

```

```

262 title(['Sismograma composto -> Origem dos dados: ',dados_entrada,...,
263       ' -> Tipo de Tiro: ',tipo_tiro]);
264 legend('Tempo de chegada','Traco sismico');
265 ylabel('Tempo (s)');
266 xlabel('Distancia (km)');
267 hold off;
268
269 % Fim do sismograma composto com as deteccoes %
270
271 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
272
273 % Mostra o tempo de chegada obtido
274 figure(2);
275 for tiro_n=1:length(t_chegada),
276     vel_red = dist(tiro_n)/veloc_red;           % Calcula vel_red
277     plot(dist(tiro_n), t_chegada(tiro_n)-vel_red,'xr'); % Mostra os pontos (x,t)
278     hold on;
279 end
280 hold off;
281 if veloc_red < Inf,      % Determinacao do intervalo de eixos
282     axis([4,ext_linha,0,8]);
283 end
284 % Fim do tempo de chegada resultante
285
286 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
287
288 % Mostra o resultado da classificacao de segmentos
289 figure(3);
290 cd SplitFuzzy;
291 for tiro_n=1:length(t_chegada),
292     vel_red = dist(tiro_n)/veloc_red;
293     plot(dist(tiro_n), t_chegada(tiro_n)-vel_red,'xr'); Mostra os pontos (x,t)
294     hold on;
295 end
296 for i = 1:2,      %% Nro de classes possiveis
297     [a,b] = mqphbr(linhaP(i).qx,linhaP(i).qt,0,0,50);
298     xi = min(linhaP(i).qx);
299     ti = a*xi + b - abs(xi)/veloc_red;
300     if i == 2;      % Mostra segmento 2
301         xf = max(linhaP(i).qx);
302         tf = a*xf + b - abs(xf)/veloc_red;
303         plot([xi xf],[ti tf],'b');
304     else            % Mostra segmento 1
305         xf = min(linhaP(i+1).qx);
306         tf = a*xf + b - abs(xf)/veloc_red;
307         plot([xi xf],[ti tf],'b:');
308     end
309 end
310
311 % O mesmo anterior, so que com as elispses de dispersao
312 figure(4);
313 for tiro_n=1:length(t_chegada),
314     plot(dist(tiro_n), t_chegada(tiro_n),'xr');

```

```

315     hold on;
316 end
317 for i = 1:2,      %% Nro de classes possiveis
318     [a,b] = mqphbr(linhaP(i).qx,linhaP(i).qt,0,0,50);
319     [K Cxt]= propagacao_utfr([linhaP(i).rho;linhaP(i).alpha], linhaP(i).Cra);
320     xi = min(linhaP(i).qx);
321     ti = a*xi + b;
322     if i == 2;      %% Mostra segmento 2
323         xf = max(linhaP(i).qx);
324         tf = a*xf + b;
325         plot([xi xf],[ti tf],'b');
326     else          %% Mostra segmento 1
327         xf = min(linhaP(i+1).qx);
328         tf = a*xf + b;
329         plot([xi xf],[ti tf],'b:');
330     end
331     h = ellipse_g(K, Cxt, 9);  %% Mostra a elipse
332 end
333 cd ..;
334 %% Fim da mostra do resultado da classificacao de segmentos
335
336 %% Mostra os pontos detectados e estimados para as fases Pg, Pn e PmP
337 figure(5);
338 for tiro_n=1:length(t_chegada),
339     vel_red = dist(tiro_n)/veloc_red;
340     plot(scale*tracos(:,tiro_n)+dist(tiro_n),...
341         ((1:length(tracos(:,tiro_n))))*Δ-vel_red);
342     plot(dist(tiro_n), t_chegada(tiro_n)-vel_red,'xr');
343     plot(dist(tiro_n), (sqrt(dist(tiro_n)^2*inv(v_sir^2) + ...
344         4*h_sir^2*inv(v_sir^2))-vel_red), 'rx');
345     hold on;
346 end
347 if veloc_red < Inf,
348     axis([4,ext_linha,0,13]);
349 end
350 title(['Sismograma composto -> Origem dos dados: ',dados_entrada,...
351     ' -> Tipo de Tiro: ',tipo_tiro]);
352 legend('Tempo de chegada','Traco sismico');
353 ylabel('Tempo (s)');
354 xlabel('Distancia (km)');
355 hold off;
356 %% Fim dos pontos detectados %%%
357
358 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
359
360 %% Mostra resultado para simulacao por SIR %%
361 cd Pmppar;
362
363 figure(6);
364 plot(dist_vel,dist_prof,'x');  %% Mostra a populacao gerada
365 h = ellipse_g([v_sir,h_sir], cov(dist_vel,dist_prof), 9); %% Elipse de incertezas
366
367 cd ..;

```

```

368
369 %% Fim do resultado por SIR %%
370
371 %% Construcao do modelo final de velocidade %%
372
373 figure(8);
374 hold on;
375 % Mostra os dados originais
376 plot([vel_crosta_org vel_crosta_org],[-prof_crosta_org 0]);
377 plot([vel_crosta_org vel_manto_org],[-prof_crosta_org -prof_crosta_org]);
378 plot([vel_manto_org vel_manto_org],[-50 -prof_crosta_org]);
379 % Mostra os dados obtidos
380 plot([v_sir v_sir],[-h_sir 0]);
381 plot([v_sir v_m],[-h_sir -h_sir]);
382 plot([v_m v_m],[-50 -h_sir]);
383 axis([6 9 -50 0]);
384 hold off;
385
386 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% == Fim do Processo == %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

## II.2 sismog.m

```

1 %% Rotina de leitura dos sismogramas no formato SAC
2 %% Seismic Analysis Code a partir do codigo desenvolvido por
3 %% Michael Thorne
4 %%
5 %% Entrada: caminho dos arquivos
6 %%
7 %% Saida: tracos: matriz MxN
8 %%     dist: vetor distancia do ponto de tiro
9 %%     Δ: periodo de amostragem (seg)
10 %%     nro_trac: vetor Mx1 contendo o nro de sensores
11 %%
12 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
13 function [traco, dist, Δ, nro_tra] = sismog(origem);
14
15
16 ext_dados='*.sac';           %Extensao do arquivo dados
17
18 data_index=dir([origem,ext_dados]); %Cria uma lista dos arquivos
19 [nro_tra null] = size(data_index); %Verifica o tamanho da lista
20
21 for J=1:nro_tra,             % Leitura em cada registro
22     traco_at = rsac([origem,data_index(J).name]); %Leitura
23     traco(1:length(traco_at(:,2)),J)=traco_at(:,2); %Selecao dos dados
24     dist(J) = lh(traco_at,'DIST');           %Leitura da posicao
25     Δ = lh(traco_at,'DELTA');               %Periodo amostragem
26 end
27

```

## II.3 rsac.m

```

1 %RSAC    Read SAC binary files.
2 %      RSAC('sacfile') reads in a SAC (seismic analysis code) binary
3 %      format file into a 3-column vector.
4 %      Column 1 contains time values.
5 %      Column 2 contains amplitude values.
6 %      Column 3 contains all SAC header information.
7 %      Default byte order is big-endian.  M-file can be set to default
8 %      little-endian byte order.
9 %
10 %      usage:  output = rsac('sacfile')
11 %
12 %      Examples:
13 %
14 %      KATH = rsac('KATH.R');
15 %      plot(KATH(:,1),KATH(:,2))
16 %
17 %      [SQRL, AAK] = rsac('SQRL.R','AAK.R');
18 %
19 %      by Michael Thorne (4/2004)  mthorne@asu.edu
20
21 function [varargout] = rsac(varargin);
22
23 for nrecs = 1:nargin
24
25     sacfile = varargin{nrecs};
26
27     %-----
28 %      Default byte-order
29 %      endian  = 'big-endian' byte order (e.g., UNIX)
30 %              = 'little-endian' byte order (e.g., LINUX)
31
32 endian = 'little-endian';
33
34 if strcmp(endian,'big-endian')
35     fid = fopen(sacfile,'r','ieee-be');
36 elseif strcmp(endian,'little-endian')
37     fid = fopen(sacfile,'r','ieee-le');
38 end
39
40 % read in single precision real header variables:
41 %-----
42 for i=1:70
43     h(i) = fread(fid,1,'single');
44 end
45

```

```

46 % read in single precision integer header variables:
47 %-----
48 for i=71:105
49     h(i) = fread(fid,1,'int32');
50 end
51
52
53 % Check header version = 6 and issue warning
54 %-----
55 % If the header version is not NVHDR == 6 then the sacfile is likely of the
56 % opposite byte order. This will give h(77) some ridiculously large
57 % number. NVHDR can also be 4 or 5. In this case it is an old SAC file
58 % and rsac cannot read this file in. To correct, read the SAC file into
59 % the newest version of SAC and w over.
60 %
61 if (h(77) == 4 | h(77) == 5)
62     message = strcat('NVHDR = 4 or 5. File: ',sacfile,...
63                     '" may be from an old version of SAC. ');
64     error(message)
65 elseif h(77) ≠ 6
66     message = strcat('Current rsac byte order: ',endian,...
67                     '". File: ',sacfile,'" may be of opposite byte-order. ');
68     error(message)
69 end
70
71 % read in logical header variables
72 %-----
73 for i=106:110
74     h(i) = fread(fid,1,'int32');
75 end
76
77 % read in character header variables
78 %-----
79 for i=111:302
80     h(i) = (fread(fid,1,'char'))';
81 end
82
83 % read in amplitudes
84 %-----
85
86 YARRAY      = fread(fid,'single');
87
88 if h(106) == 1
89     XARRAY = (linspace(h(6),h(7),h(80)))';
90 else
91     error('LEVEN must = 1; SAC file not evenly spaced')
92 end
93
94 % add header signature for testing files for SAC format
95 %-----
96 h(303) = 77;
97 h(304) = 73;
98 h(305) = 75;

```

```

99 h(306) = 69;
100
101 % arrange output files
102 %-----
103 OUTPUT(:,1) = XARRAY;
104 OUTPUT(:,2) = YARRAY(1:length(XARRAY));
105 OUTPUT(1:306,3) = h(1:306)';
106
107 %pad xarray and yarray with NaN if smaller than header field
108 if h(80) < 306
109     OUTPUT((h(80)+1):306,1) = NaN;
110     OUTPUT((h(80)+1):306,2) = NaN;
111 end
112
113 fclose(fid);
114
115 varargout{nrecs} = OUTPUT;
116
117 end

```

## II.4 lh.m

```

1 %LH    list SAC header
2 %
3 %    Read or set matlab variables to SAC header variables from
4 %    SAC files read in to matlab with rsac.m
5 %
6 %    Examples:
7 %
8 %    To list all defined header variables in the file KATH:
9 %    lh(KATH)
10 %
11 %    To assign the SAC variable DELTA from station KATH to
12 %    the matlab variable dt:
13 %
14 %    dt = lh(KATH,'DELTA');
15 %
16 %    To assign the SAC variables STLA and STLO from station KATH
17 %    to the matlab variables lat and lon:
18 %
19 %    [lat,lon] = lh(KATH,'STLA','STLO')
20 %
21 %    by Michael Thorne (4/2004) mthorne@asu.edu
22 %
23 %    See also:  RSAC, CH, BSAC, WSAC
24
25 function [varargout] = lh(file,varargin);
26
27 % first test to see if the file is indeed a sacfile

```

```

28 %
29 if (file(303,3)≠77 & file(304,3)≠73 & file(305,3)≠75 & file(306,3)≠69)
30     error('Specified Variable is not in SAC format ...')
31 end
32
33 h(1:306) = file(1:306,3);
34
35
36 % read real header variables
37 %
38 DELTA = h(1);
39 if (h(1) ≠ -12345 & nargin == 1); disp(sprintf('DELTA      = %0.8g',h(1))); end
40 DEPMIN = h(2);
41 if (h(2) ≠ -12345 & nargin == 1); disp(sprintf('DEPMIN     = %0.8g',h(2))); end
42 DEPMAX = h(3);
43 if (h(3) ≠ -12345 & nargin == 1); disp(sprintf('DEPMAX     = %0.8g',h(3))); end
44 SCALE = h(4);
45 if (h(4) ≠ -12345 & nargin == 1); disp(sprintf('SCALE      = %0.8g',h(4))); end
46 ODELTA = h(5);
47 if (h(5) ≠ -12345 & nargin == 1); disp(sprintf('ODELTA     = %0.8g',h(5))); end
48 B = h(6);
49 if (h(6) ≠ -12345 & nargin == 1); disp(sprintf('B          = %0.8g',h(6))); end
50 E = h(7);
51 if (h(7) ≠ -12345 & nargin == 1); disp(sprintf('E          = %0.8g',h(7))); end
52 O = h(8);
53 if (h(8) ≠ -12345 & nargin == 1); disp(sprintf('O          = %0.8g',h(8))); end
54 A = h(9);
55 if (h(9) ≠ -12345 & nargin == 1); disp(sprintf('A          = %0.8g',h(9))); end
56 T0 = h(11);
57 if (h(11) ≠ -12345 & nargin == 1); disp(sprintf('T0         = %0.8g',h(11))); end
58 T1 = h(12);
59 if (h(12) ≠ -12345 & nargin == 1); disp(sprintf('T1         = %0.8g',h(12))); end
60 T2 = h(13);
61 if (h(13) ≠ -12345 & nargin == 1); disp(sprintf('T2         = %0.8g',h(13))); end
62 T3 = h(14);
63 if (h(14) ≠ -12345 & nargin == 1); disp(sprintf('T3         = %0.8g',h(14))); end
64 T4 = h(15);
65 if (h(15) ≠ -12345 & nargin == 1); disp(sprintf('T4         = %0.8g',h(15))); end
66 T5 = h(16);
67 if (h(16) ≠ -12345 & nargin == 1); disp(sprintf('T5         = %0.8g',h(16))); end
68 T6 = h(17);
69 if (h(17) ≠ -12345 & nargin == 1); disp(sprintf('T6         = %0.8g',h(17))); end
70 T7 = h(18);
71 if (h(18) ≠ -12345 & nargin == 1); disp(sprintf('T7         = %0.8g',h(18))); end
72 T8 = h(19);
73 if (h(19) ≠ -12345 & nargin == 1); disp(sprintf('T8         = %0.8g',h(19))); end
74 T9 = h(20);
75 if (h(20) ≠ -12345 & nargin == 1); disp(sprintf('T9         = %0.8g',h(20))); end
76 F = h(21);
77 if (h(21) ≠ -12345 & nargin == 1); disp(sprintf('F          = %0.8g',h(21))); end
78 RESPO = h(22);
79 if (h(22) ≠ -12345 & nargin == 1); disp(sprintf('RESPO     = %0.8g',h(22))); end
80 RESP1 = h(23);

```

```

81 if (h(23) ≠ -12345 & nargin == 1); disp(sprintf('RESP1 = %0.8g',h(23))); end
82 RESP2 = h(24);
83 if (h(24) ≠ -12345 & nargin == 1); disp(sprintf('RESP2 = %0.8g',h(24))); end
84 RESP3 = h(25);
85 if (h(25) ≠ -12345 & nargin == 1); disp(sprintf('RESP3 = %0.8g',h(25))); end
86 RESP4 = h(26);
87 if (h(26) ≠ -12345 & nargin == 1); disp(sprintf('RESP4 = %0.8g',h(26))); end
88 RESP5 = h(27);
89 if (h(27) ≠ -12345 & nargin == 1); disp(sprintf('RESP5 = %0.8g',h(27))); end
90 RESP6 = h(28);
91 if (h(28) ≠ -12345 & nargin == 1); disp(sprintf('RESP6 = %0.8g',h(28))); end
92 RESP7 = h(29);
93 if (h(29) ≠ -12345 & nargin == 1); disp(sprintf('RESP7 = %0.8g',h(29))); end
94 RESP8 = h(30);
95 if (h(30) ≠ -12345 & nargin == 1); disp(sprintf('RESP8 = %0.8g',h(30))); end
96 RESP9 = h(31);
97 if (h(31) ≠ -12345 & nargin == 1); disp(sprintf('RESP9 = %0.8g',h(31))); end
98 STLA = h(32);
99 if (h(32) ≠ -12345 & nargin == 1); disp(sprintf('STLA = %0.8g',h(32))); end
100 STLO = h(33);
101 if (h(33) ≠ -12345 & nargin == 1); disp(sprintf('STLO = %0.8g',h(33))); end
102 STEL = h(34);
103 if (h(34) ≠ -12345 & nargin == 1); disp(sprintf('STEL = %0.8g',h(34))); end
104 STDP = h(35);
105 if (h(35) ≠ -12345 & nargin == 1); disp(sprintf('STDP = %0.8g',h(35))); end
106 EVLA = h(36);
107 if (h(36) ≠ -12345 & nargin == 1); disp(sprintf('EVLA = %0.8g',h(36))); end
108 EVLO = h(37);
109 if (h(37) ≠ -12345 & nargin == 1); disp(sprintf('EVLO = %0.8g',h(37))); end
110 EVEL = h(38);
111 if (h(38) ≠ -12345 & nargin == 1); disp(sprintf('EVEL = %0.8g',h(38))); end
112 EVDP = h(39);
113 if (h(39) ≠ -12345 & nargin == 1); disp(sprintf('EVDP = %0.8g',h(39))); end
114 MAG = h(40);
115 if (h(40) ≠ -12345 & nargin == 1); disp(sprintf('MAG = %0.8g',h(40))); end
116 USER0 = h(41);
117 if (h(41) ≠ -12345 & nargin == 1); disp(sprintf('USER0 = %0.8g',h(41))); end
118 USER1 = h(42);
119 if (h(42) ≠ -12345 & nargin == 1); disp(sprintf('USER1 = %0.8g',h(42))); end
120 USER2 = h(43);
121 if (h(43) ≠ -12345 & nargin == 1); disp(sprintf('USER2 = %0.8g',h(43))); end
122 USER3 = h(44);
123 if (h(44) ≠ -12345 & nargin == 1); disp(sprintf('USER3 = %0.8g',h(44))); end
124 USER4 = h(45);
125 if (h(45) ≠ -12345 & nargin == 1); disp(sprintf('USER4 = %0.8g',h(45))); end
126 USER5 = h(46);
127 if (h(46) ≠ -12345 & nargin == 1); disp(sprintf('USER5 = %0.8g',h(46))); end
128 USER6 = h(47);
129 if (h(47) ≠ -12345 & nargin == 1); disp(sprintf('USER6 = %0.8g',h(47))); end
130 USER7 = h(48);
131 if (h(48) ≠ -12345 & nargin == 1); disp(sprintf('USER7 = %0.8g',h(48))); end
132 USER8 = h(49);
133 if (h(49) ≠ -12345 & nargin == 1); disp(sprintf('USER8 = %0.8g',h(49))); end

```

```

134 USER9 = h(50);
135 if (h(50) ≠ -12345 & nargin == 1); disp(sprintf('USER9 = %0.8g',h(50))); end
136 DIST = h(51);
137 if (h(51) ≠ -12345 & nargin == 1); disp(sprintf('DIST = %0.8g',h(51))); end
138 AZ = h(52);
139 if (h(52) ≠ -12345 & nargin == 1); disp(sprintf('AZ = %0.8g',h(52))); end
140 BAZ = h(53);
141 if (h(53) ≠ -12345 & nargin == 1); disp(sprintf('BAZ = %0.8g',h(53))); end
142 GCARC = h(54);
143 if (h(54) ≠ -12345 & nargin == 1); disp(sprintf('GCARC = %0.8g',h(54))); end
144 DEPMEN = h(57);
145 if (h(57) ≠ -12345 & nargin == 1); disp(sprintf('DEPMEN = %0.8g',h(57))); end
146 CMPAZ = h(58);
147 if (h(58) ≠ -12345 & nargin == 1); disp(sprintf('CMPAZ = %0.8g',h(58))); end
148 CMPINC = h(59);
149 if (h(59) ≠ -12345 & nargin == 1); disp(sprintf('CMPINC = %0.8g',h(59))); end
150 XMINIMUM = h(60);
151 if (h(60) ≠ -12345 & nargin == 1); disp(sprintf('XMINIMUM = %0.8g',h(60))); end
152 XMAXIMUM = h(61);
153 if (h(61) ≠ -12345 & nargin == 1); disp(sprintf('XMAXIMUM = %0.8g',h(61))); end
154 YMINIMUM = h(62);
155 if (h(62) ≠ -12345 & nargin == 1); disp(sprintf('YMINIMUM = %0.8g',h(62))); end
156 YMAXIMUM = h(63);
157 if (h(63) ≠ -12345 & nargin == 1); disp(sprintf('YMAXIMUM = %0.8g',h(63))); end
158
159 % read integer header variables
160 %-----
161 NZYEAR = round(h(71));
162 if (h(71) ≠ -12345 & nargin == 1); disp(sprintf('NZYEAR = %d',...
163     h(71))); end
164 NZJDAY = round(h(72));
165 if (h(72) ≠ -12345 & nargin == 1); disp(sprintf('NZJDAY = %d',...
166     h(72))); end
167 NZHOUR = round(h(73));
168 if (h(73) ≠ -12345 & nargin == 1); disp(sprintf('NZHOUR = %d',...
169     h(73))); end
170 NZMIN = round(h(74));
171 if (h(74) ≠ -12345 & nargin == 1); disp(sprintf('NZMIN = %d',...
172     h(74))); end
173 NZSEC = round(h(75));
174 if (h(75) ≠ -12345 & nargin == 1); disp(sprintf('NZSEC = %d',...
175     h(75))); end
176 NZMSEC = round(h(76));
177 if (h(76) ≠ -12345 & nargin == 1); disp(sprintf('NZMSEC = %d',...
178     h(76))); end
179 NVHDR = round(h(77));
180 if (h(77) ≠ -12345 & nargin == 1); disp(sprintf('NVHDR = %d',...
181     h(77))); end
182 NORID = round(h(78));
183 if (h(78) ≠ -12345 & nargin == 1); disp(sprintf('NORID = %d',...
184     h(78))); end
185 NEVID = round(h(79));
186 if (h(79) ≠ -12345 & nargin == 1); disp(sprintf('NEVID = %d',...

```

```

187     h(79)); end
188 NPTS = round(h(80));
189 if (h(80) ≠ -12345 & nargin == 1); disp(sprintf('NPTS      = %d',...
190     h(80))); end
191 NWFID = round(h(82));
192 if (h(82) ≠ -12345 & nargin == 1); disp(sprintf('NWFID      = %d',...
193     h(82))); end
194 NXSIZE = round(h(83));
195 if (h(83) ≠ -12345 & nargin == 1); disp(sprintf('NXSIZE     = %d',...
196     h(83))); end
197 NYSIZE = round(h(84));
198 if (h(84) ≠ -12345 & nargin == 1); disp(sprintf('NYSIZE     = %d',...
199     h(84))); end
200 IFTYPE = round(h(86));
201 if (h(86) ≠ -12345 & nargin == 1); disp(sprintf('IFTYPE     = %d',...
202     h(86))); end
203 IDEP = round(h(87));
204 if (h(87) ≠ -12345 & nargin == 1); disp(sprintf('IDEP       = %d',...
205     h(87))); end
206 IZTYPE = round(h(88));
207 if (h(88) ≠ -12345 & nargin == 1); disp(sprintf('IZTYPE     = %d',...
208     h(88))); end
209 IINST = round(h(90));
210 if (h(90) ≠ -12345 & nargin == 1); disp(sprintf('IINST      = %d',...
211     h(90))); end
212 ISTREG = round(h(91));
213 if (h(91) ≠ -12345 & nargin == 1); disp(sprintf('ISTREG     = %d',...
214     h(91))); end
215 IEVREG = round(h(92));
216 if (h(92) ≠ -12345 & nargin == 1); disp(sprintf('IEVREG     = %d',...
217     h(92))); end
218 IEVTYP = round(h(93));
219 if (h(93) ≠ -12345 & nargin == 1); disp(sprintf('IEVTYP     = %d',...
220     h(93))); end
221 IQUAL = round(h(94));
222 if (h(94) ≠ -12345 & nargin == 1); disp(sprintf('IQUAL      = %d',...
223     h(94))); end
224 ISYNTH = round(h(95));
225 if (h(95) ≠ -12345 & nargin == 1); disp(sprintf('ISYNTH     = %d',...
226     h(95))); end
227 IMAGTYP = round(h(96));
228 if (h(96) ≠ -12345 & nargin == 1); disp(sprintf('IMAGTYP    = %d',...
229     h(96))); end
230 IMAGSRC = round(h(97));
231 if (h(97) ≠ -12345 & nargin == 1); disp(sprintf('IMAGSRC    = %d',...
232     h(97))); end
233
234 %read logical header variables
235 %-----
236 LEVEN = round(h(106));
237 if (h(106) ≠ -12345 & nargin == 1); disp(sprintf('LEVEN      = %d',...
238     h(106))); end
239 LPSPOL = round(h(107));

```

```

240 if (h(107) ≠ -12345 & nargin == 1); disp(sprintf('LPSPOL      = %d',...
241     h(107))); end
242 LOVROK = round(h(108));
243 if (h(108) ≠ -12345 & nargin == 1); disp(sprintf('LOVROK      = %d',...
244     h(108))); end
245 LCALDA = round(h(109));
246 if (h(109) ≠ -12345 & nargin == 1); disp(sprintf('LCALDA      = %d',...
247     h(109))); end
248
249 %read character header variables
250 %-----
251 KSTNM = char(h(111:118));
252 if (str2double(KSTNM) ≠ -12345 & nargin == 1);
253     disp(sprintf('KSTNM      = %s', KSTNM)); end
254 KEVNM = char(h(119:134));
255 if (str2double(KEVNM) ≠ -12345 & nargin == 1);
256     disp(sprintf('KEVNM      = %s', KEVNM)); end
257 KHOLE = char(h(135:142));
258 if (str2double(KHOLE) ≠ -12345 & nargin == 1);
259     disp(sprintf('KHOLE      = %s', KHOLE)); end
260 KO = char(h(143:150));
261 if (str2double(KO) ≠ -12345 & nargin == 1);
262     disp(sprintf('KO          = %s', KO)); end
263 KA = char(h(151:158));
264 if (str2double(KA) ≠ -12345 & nargin == 1);
265     disp(sprintf('KA          = %s', KA)); end
266 KT0 = char(h(159:166));
267 if (str2double(KT0) ≠ -12345 & nargin == 1);
268     disp(sprintf('KT0          = %s', KT0)); end
269 KT1 = char(h(167:174));
270 if (str2double(KT1) ≠ -12345 & nargin == 1);
271     disp(sprintf('KT1          = %s', KT1)); end
272 KT2 = char(h(175:182));
273 if (str2double(KT2) ≠ -12345 & nargin == 1);
274     disp(sprintf('KT2          = %s', KT2)); end
275 KT3 = char(h(183:190));
276 if (str2double(KT3) ≠ -12345 & nargin == 1);
277     disp(sprintf('KT3          = %s', KT3)); end
278 KT4 = char(h(191:198));
279 if (str2double(KT4) ≠ -12345 & nargin == 1);
280     disp(sprintf('KT4          = %s', KT4)); end
281 KT5 = char(h(199:206));
282 if (str2double(KT5) ≠ -12345 & nargin == 1);
283     disp(sprintf('KT5          = %s', KT5)); end
284 KT6 = char(h(207:214));
285 if (str2double(KT6) ≠ -12345 & nargin == 1);
286     disp(sprintf('KT6          = %s', KT6)); end
287 KT7 = char(h(215:222));
288 if (str2double(KT7) ≠ -12345 & nargin == 1);
289     disp(sprintf('KT7          = %s', KT7)); end
290 KT8 = char(h(223:230));
291 if (str2double(KT8) ≠ -12345 & nargin == 1);
292     disp(sprintf('KT8          = %s', KT8)); end

```

```

293 KT9 = char(h(231:238));
294 if (str2double(KT9)  $\neq$  -12345 & nargin == 1);
295     disp(sprintf('KT9           = %s', KT9)); end
296 KF = char(h(239:246));
297 if (str2double(KF)  $\neq$  -12345 & nargin == 1);
298     disp(sprintf('KF           = %s', KF)); end
299 KUSER0 = char(h(247:254));
300 if (str2double(KUSER0)  $\neq$  -12345 & nargin == 1);
301     disp(sprintf('KUSER0        = %s', KUSER0)); end
302 KUSER1 = char(h(255:262));
303 if (str2double(KUSER1)  $\neq$  -12345 & nargin == 1);
304     disp(sprintf('KUSER1        = %s', KUSER1)); end
305 KUSER2 = char(h(263:270));
306 if (str2double(KUSER2)  $\neq$  -12345 & nargin == 1);
307     disp(sprintf('KUSER2        = %s', KUSER2)); end
308 KCMPNM = char(h(271:278));
309 if (str2double(KCMPNM)  $\neq$  -12345 & nargin == 1);
310     disp(sprintf('KCMPNM        = %s', KCMPNM)); end
311 KNETWK = char(h(279:286));
312 if (str2double(KNETWK)  $\neq$  -12345 & nargin == 1);
313     disp(sprintf('KNETWK        = %s', KNETWK)); end
314 KDATRD = char(h(287:294));
315 if (str2double(KDATRD)  $\neq$  -12345 & nargin == 1);
316     disp(sprintf('KDATRD        = %s', KDATRD)); end
317 KINST = char(h(295:302));
318 if (str2double(KINST)  $\neq$  -12345 & nargin == 1);
319     disp(sprintf('KINST         = %s', KINST)); end
320
321
322 if nargin > 1
323     for nrecs = 1:(nargin-1);
324         varargout{nrecs} = eval(varargin{nrecs});
325     end
326 end

```

## II.5 deteccion\_kf.m

```

1 %% Rotina de deteccion de fase com filtro de Kalman
2 %%
3 %% Entrada: tracos - registros
4 %%            $\Delta$  - periodo de amostragem
5 %%           nro_trac - numero de registros
6 %%           inc_mode, inc_mode2 - incerteza do modelo
7 %%           inc_med - incerteza de medicao
8 %%
9 %% Saida: vetor Mx1 com o tempo de chegada da fase
10 %%
11 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
12 function t_cheg = deteccion_kf(sismog,  $\Delta$ , nro_tra, Q, Q1, R)

```

```

13
14     %% Implementa o filtro para cada traço utilizado (nro_tra)
15     for J=1:nro_tra,
16         if J==1     %% Caso seja o primeiro traco
17             amostras(J) = kf(sismog(:,J),Δ, Q, Q1, R);
18         else     %% Para outros tracos
19             amostras(J) = kf(sismog(ceil(amostras(J-1)-100):...
20                 length(sismog(:,J)),J),Δ, Q, Q1, R);
21             amostras(J) = amostras(J)+ceil(amostras(J-1)-100);
22         end
23     t_cheg(J) = amostras(J)*Δ; % Transf. de amostras em segundos
24     end
25
26     %% == Fim do algoritmo ==

```

## II.6 kf

```

1 function amostra = kf(dados,P,Q,Q1,R,OrdAR)
2
3     %%%%                               Filtro de Kalman Autoregressivo                               %%%
4     %%%%                               ---== Deteccao de Eventos ==---                               %%%
5     %%%%                               %%%                               %%%
6     %%%%                               Frederico Xavier de Melo – Dezembro/2005                               %%%
7     %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
8
9     %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
10    %%%%                               Parametros Iniciais do Filtro de Kalman                               %%%
11    %%%%                               %%%                               %%%
12    %%%%                               X(k) = A*X(k-1) + Q      -> Modelo de observacao   %%%
13    %%%%                               Y(k) = H*X(k) + R        -> Modelo de medicao     %%%
14    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
15
16
17    Qa=Q;                               % Incertezas relacionadas ao
18    Qd=Q1;                               % modelo.
19
20    OrdAR = 2;                            % Ordem do modelo AR desejado
21    Aminic = OrdAR*10;                    % Atraso nas amostras para
22    % determinacao do modelo AR
23    m = Aminic - 1;                       % Espaço para calculo da covariancia
24    % amostral do termo de inovacao
25
26    amostra=1
27    limiar = 3.84;                        % Limiar do teste da dist. Mahalanobis
28
29    Ri(Aminic-1) = R;                     % Incerteza de medicao
30
31    %%% Construcao da Matriz de transicao de estados
32    for mi=1:(2*OrdAR),
33        A(mi,mi)=1;                       % Diagonal unitaria

```

```

33         if ( mi ≤ (OrdAR))
34             A(mi,OrdAR+mi)=P;           % Termos do periodo de amostragem
35             Q(mi,mi)=Qa;               % Incerteza do coef. AR
36         else
37             Q(mi,mi)=Qd;               % Incerteza da variacao do coef. AR
38         end
39     end
40
41
42     %% Valores iniciais das variaveis %%
43     %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
44     Xp(2*OrdAR,1)=0;                   %Amostra presente
45     Xf(2*OrdAR,1)=0;                   %Amostra futura
46     Kk(2*OrdAR,1,1)=0;                 %Ganho de Kalman
47     Pp(2*OrdAR,2*OrdAR)=0;            %Matriz de covariancia presente
48     Pf(2*OrdAR,2*OrdAR)=0;            %Matriz de covariancia futura
49     distm(1)=0;                         %Distancia da Mahalanobis
50
51     Vi = aryule(dados(1:Aminic),OrdAR); %Modelo AR de 4ª ordem
52     Xp(1:OrdAR) = Vi(2:ceil(OrdAR)+1);
53     Xp(OrdAR+1:2*OrdAR) = zeros(1,OrdAR);
54
55     for n=1:2*OrdAR,                   % Define valores para as diagonais da
56         Pp(n,n) = 100;                 % matrizes de covariancia
57         Pf(n,n) = 100;
58     end
59
60     %% Variaveis auxiliares %%
61     %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
62     Xf1 = zeros(2*OrdAR,1);           % Variavel de auxilio para amostra
63     Pf1 = zeros(2*OrdAR,2*OrdAR);     % Variavel de auxilio para matriz de
64                                         % covariancia
65     result=0;                          % Flag de chegada de fase -> 0=nada,
66                                         % 1=chegada
67
68     %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
69     %%% Inicio do processo recursivo do filtro de Kalman %%%
70     %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
71
72     esp = waitbar(0,'Please wait...');   % Barra de espera
73     for k=Aminic:length(dados),
74
75         H1 = [zeros(1,OrdAR) dados(k-OrdAR:k-1)'];
76         for io=1:2*OrdAR
77             H(io) = H1(2*OrdAR-io+1);
78         end
79
80         if (k ≤Aminic)
81             Xf1 = Xp;
82             Pf1 = Pp;
83         else
84             Xf1 = Xf;
85             Pf1 = Pf;

```

```

86         end
87
88
89         %% Nucleo do filtro de Kalman
90
91         Kk(:, :, k) = Pfl*(H') * inv((H*Pfl*(H') + Ri(k-1))); %Calcula ganho
92         Xp = Xf1 + Kk(:, :, k)*(dados(k)-H*Xf1);      %Amostra presente X(k|k)
93
94         %% Armazena o termo de inovacao
95         inov(k) = dados(k) - H*Xp;
96
97         %%Matriz de covariancia presente P(k|k)
98         Pp = (eye(size(Pp)) - Kk(:, :, k)*H)*Pfl*(eye(size(Pp))...
99             - Kk(:, :, k)*H)') + Kk(:, :, k)*Ri(k-1)*(Kk(:, :, k)');
100        Xf = A*Xp;                                     %Amostra futura X(k+1|k)
101        Pf = A*Pp*(A') + Q;                             %Matriz de covariancia
102                                                    % futura P(k+1|k)
103
104        if(k > Aminic + 0.01*length(dados))
105            %% Distancia de Mahalaobis %
106            distm(k) = (dados(k)-H*Xf1)'*inv(Ri(k-1) + H*Pp*(H'))*(dados(k)-H*Xf1);
107            if (distm(k) > limiar)
108                for i=k-ceil(.3*k):k,      %% Teste da dist. Mahalanobis verredura
109                    if distm(i) > .35*limiar,
110                        result = 2; % Se o teste falhar, flag eh acionado
111                        amostra = i;      % A amostra e considerada como chegada
112                        break;           % Encerra o algoritmo
113                    end
114                end
115                if result ≠ 2,             % Se nada for encontrado
116                    amostra=k;           % A primeira amostra que falhou no teste
117                end                       % e de chegada
118                result=1;
119                break;
120            end
121        end
122    end
123
124    Ri(k) = R;          % Incerteza do modelo
125
126
127    waitbar(k/length(dados)); % Incrementa o contador de espera
128
129    end
130    close(esp);        % Fecha barra de espera
131
132    %% == Fim do algoritmo ==

```

## II.7 extr\_classP.m

```

1 %% Rotina de extracao e classificacao de segmentos de reta
2 %%
3 %% Entrada: dist - vetor de distancia do ponto de tiro
4 %%           t_chegada - vetor de tempo de chegada da fase
5 %%           Δ_max - fator de dispersao maximo
6 %%
7 %% Saida: linhaP - Kernel das linhas classificadas
8 %%
9 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
10 function linhas = extr_classP(dist, t_chegada, Δ_max)
11
12 vel_Pn = 7.0;           % Limiar de velocidade para Pn
13
14
15 %% Extracao de segmentos por SMF_____
16 ker = smfz_06(dist,t_chegada,Δ_max);
17
18 %% Mostra o resultado grafico
19 figure(1);
20 hold on;
21 %% Constroi os segmentos a partir dos pontos de suporte de cada reta
22 for i = 1:length(ker),
23     [a,b] = mqphbr(ker(i).qx,ker(i).qt,0,0,50);
24     xi = min(ker(i).qx);
25     ti = a*xi + b - abs(xi)/7;
26     if i == length(ker);
27         xf = max(ker(i).qx);
28         tf = a*xf + b - abs(xf)/7;
29         plot([xi xf],[ti tf],'b'); % Mostra a reta
30     else
31         xf = min(ker(i+1).qx);
32         tf = a*xf + b - abs(xf)/7;
33         plot([xi xf],[ti tf],'b'); % Mostra a reta
34     end
35 end
36
37
38 %% Classificacao dos segmentos extraidos_____
39
40 i1=0; i2=0; %Inicia variaveis auxiliares
41
42 %% Teste realizado em cada segmento extraido
43 for i = 1:length(ker),
44     a(i) = sin(ker(i).alpha)/cos(ker(i).alpha);
45     if(a(i) < inv(vel_Pn)) % Caso o coef. angular for menor que o
46         i2 = i2 +1; % estipulado, grupo da Moho
47         tv2(i2) = i;
48     else
49         % senao, pertence a crosta
50         i1 = i1+1;

```

```

50         tv1(i1) = i;
51     end
52 end
53
54 %% Agrupar classificacao em segmentos e calcular incertezas
55
56 pto_x_Pn = cat(2,ker(tv2).qx);           %Agrupa os pontos de suporte
57 pto_t_Pn = cat(2,ker(tv2).qt);           %Agrupa os pontos de suporte
58 pto_u_Pn = cat(2,ker(tv2).u);           %Agrupa os pesos
59 seg_Pn = gera_seg(pto_x_Pn, pto_t_Pn);
60
61 % Calcula o erro de classificacao em coordenadas polares
62 seg_Pn.Cra=prop_inc(seg_Pn.qx, seg_Pn.qt, pto_u_Pn, seg_Pn.rho,...
63                     seg_Pn.alpha);
64
65 % Conversao para as coordenadas Gaussianas
66 [K_m seg_Pn.Cxt]= propagacao_utfr([seg_Pn.rho;seg_Pn.alpha], seg_Pn.Cra);
67
68 % Cria o segmento das chegadas das fases Pn
69 pto_x_P = cat(2,ker(tv1).qx);
70 pto_t_P = cat(2,ker(tv1).qt);
71 pto_u_P = cat(2,ker(tv1).u);
72 seg_P = gera_seg(pto_x_P, pto_t_P);
73
74 % Construcao das chegadas das fases Pg
75 seg_P.Cra=prop_inc(seg_P.qx, seg_P.qt, pto_u_P, seg_P.rho, seg_P.alpha);
76 % Funcao de propag incertezas
77 [K_p seg_P.Cxt]= propagacao_utfr([seg_P.rho;seg_P.alpha], seg_P.Cra);
78
79 linhas = [seg_P seg_Pn];    % Segmentos classificados sao agrupados
80                     % em so um segmento
81
82 %% == Fim do algoritmo ==

```

```

1 function lf = smfz(x,t,limite)
2
3     %%      Algoritmo Split Merge and Fuzzy (SMF)      %%
4     %%      ==Para extracao de linhas em dados de ==      %%
5     %%      ==      sismologia no dominio X-T      ==      %%
6     %%      %%      %%
7     %%      Parametros:      %%
8     %%      -Entrada: distancia do evento (x)      %%
9     %%      tempo de chegada fase (t)      %%
10    %%      limiar de selecao (limite)      %%
11    %%      %%      %%
12    %%      -Saida: kernel sobre cada linha extraida      %%
13    %%      %%      %%
14    %%      Frederico Xavier de Melo - Outubro-2005      %%
15    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
16
17
18    %% Definir funcoes de execucao !!
19
20    Nl(1) = 1;      %Numero inicial de linhas
21    m = 1;      %Numero da geracao de linhas
22    fstop=0;      %Variavel de controle para agrupamento de linhas
23    verif =0;      %Flag de controle para verificar se houve agrupamento de linhas
24    Δ = inf; %Valor inicial para comparacao com o limite de selecao escolhido
25              % pelo usuario
26
27    %% Estrutura da linha selecionada      %%
28    %%      %%
29    %% -rho e alpha - coordenadas polares da reta      %%
30    %% -cgx e cgt - centro de gravidade da reta (x,t)      %%
31    %% -qx e qt - pontos que pertencem a linha extraida      %%
32    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
33    l = struct('rho',0,'alpha',0,'cgx',0,'cgt',0,'qx',[],'qt',[],'u',[]);
34    lf = struct('rho',0,'alpha',0,'cgx',0,'cgt',0,'qx',[],'qt',[],'u',[]);
35
36
37    xtam = length(x);
38
39    %% A Estimativa inicial e feita como se existisse apenas para uma reta
40    %% O Metodo dos Minimos Quadrados e utilizado para estimar os parametros
41    %% estruturais da reta.
42
43    [ai,bi,Wi] = mqphbr(x,t,0,0,0); %Min. Quadrados Ponderados para 1 iteracao
44    l(1).cgx = sum(x)/xtam;      %Determinacao do centro de gravidade de x
45    l(1).cgt = sum(t)/xtam;      %Determinacao do centro de gravidade de t
46    Sxin = sum((x - l(1).cgx).^2); %Autocorrelacao das amostras da reta em x
47    Stin = sum((t - l(1).cgt).^2); %Autocorrelacao das amostras da reta em t
48    Sxtin = sum((x - l(1).cgx).*(t - l(1).cgt)); %Correlacao cruzada entre x e t
49

```

```

50 l(1).alpha = 0.5*atan(-2*Sxtin/(Stin - Sxin));% Calculo do angulo da
51 % coordenada polar
52 %Calculo do raio - coordenada polar
53 l(1).rho = l(1).cgx*cos(l(1).alpha) + l(1).cgt*sin(l(1).alpha);
54 l(1).qx = x; %Pontos que pertencem a reta (todos a priori)
55 l(1).qt = t;
56 lesc = l;
57
58 %%% Verifica se o limite eh compativel, caso seja maior que Δ, o
59 %%% limite eh reduzido para Δ/10
60
61 Δt = sum((l(1).rho - l(1).qx*cos(l(1).alpha) - l(1).qt*...
62 sin(l(1).alpha)).^2)/length(l(1).qx); % Calcula o limite inicial
63 if limite ≥ Δt,
64 limite = Δt/10;
65 end
66
67 %% Fase de selecao das retas a partir dos dados da amostra inicial %%
68 %% utilizando o metodo de Split e Fuzzy Clustering %%
69 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
70
71 while (max(sqrt(Δ)) > limite) % Termina da fase do split
72 % quando todas as linhas possuem
73 % dispersao < limite
74 if (m > length(x)),
75 clear l;
76 l = lesc;
77 disp('Erro -> Valor limite inferior a precisao da reta -> Abortando');
78 break;
79 else
80 m = m+1; %Numero de geracoes de retas
81 Nl(m) = Nl(m-1); %Atualiza o numero de linhas extraidas
82 for k = 1:Nl(m), %Verifica todas as linhas extraidas
83 %Calculo da dispersao da reta k
84 Δ(k) = sum((l(k).rho - l(k).qx*cos(l(k).alpha) -...
85 l(k).qt*sin(l(k).alpha)).^2)/length(l(k).qx);
86 if(sqrt(Δ(k)) > limite) %Condicao para realizacao do Fuzzy
87 % Fuzzy clustering para 2 segmentos
88 [ret_nov, flgcon] = fuzzym(l(k).qx, l(k).qt,m);
89 if (flgcon == 1)
90 l(k).qx = ret_nov(1).qx;
91 l(k).qt = ret_nov(1).qt;
92 else
93 l(k) = ret_nov(1); % A reta atual e substituida por
94 % das retas do fuzzy
95 l(Nl(m) +1) = ret_nov(2); % A reta e acrescentada ao nro
96 % total de retas
97 Nl(m) = Nl(m) + 1; %Valor do numero de retas atual
98 end
99 end
100 end
101 end
102 end

```

```

103
104 %% == Fim da fase de extracao de linhas == %%
105
106
107 %% Fase de agrupamento das retas extraidas no metodo SMF
108 %% Caso o agrupamento apresente menor dispersao do que o limite escolhido
109 %% pelo usuario elimina-se uma reta do total encontrado no metodo anterior
110 %% e a reta atual passa a possuir mais pontos
111 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
112
113 while(fstop == 0) %Criterio de parada do algoritmo de agrupamento
114     for k = 1: Nl(m), %Verifica todas as retas
115         if Nl(m) == 1, %Caso nao tenha como agrupar
116             fstop=1; %Sai do programa
117             break;
118         elseif k > length(l),
119             break;
120         end
121
122         if Nl(m) < 3,
123             clear lf;
124             lf = l(1);
125             if(l(1).cgx > l(2).cgx) % Verifica a posicao retas
126                 lf.qx = [l(2).qx l(1).qx]; % e determina composicao
127                 lf.qt = [l(2).qt l(1).qt]; % dos pontos da candidata
128                 % virar uma reta
129             else
130                 lf.qx = [l(1).qx l(2).qx];
131                 lf.qt = [l(1).qt l(2).qt];
132             end %if(l(1).cgx > l(2).cgx)
133         else
134             clear lf; clear lt; clear residuo; % remove as variaveis
135             for i = 1:Nl(m),
136                 %Calcula a diferenca dos centros de gravidade
137                 %De modo a obter as retas mais proximas
138                 residuo(i) = (l(i).cgx - l(k).cgx)^2+(l(i).cgt - l(k).cgt)^2;
139             end %for i = 1:Nl(m),
140                 [val, indx] = sort(residuo); %Ordena de forma crescente a
141                 lt = l(indx(4:Nl(m)));
142                 lf(1) = l(k); %Monta a estrutura de agrupamento
143                 lf(2) = l(k);
144                 if(l(k).cgx > l(indx(2)).cgx) % Verifica a posicao das retas
145                     lf(1).qx = [l(indx(2)).qx l(k).qx];
146                     lf(1).qt = [l(indx(2)).qt l(k).qt];
147                 elseif(l(k).cgx < l(indx(2)).cgx)
148                     lf(1).qx = [l(k).qx l(indx(2)).qx];
149                     lf(1).qt = [l(k).qt l(indx(2)).qt];
150                 end %if(l(k).cgx > l(indx(2)).cgx)
151                 if(l(k).cgx > l(indx(3)).cgx)
152                     lf(2).qx = [l(indx(3)).qx l(k).qx];
153                     lf(2).qt = [l(indx(3)).qt l(k).qt];
154                 elseif(l(k).cgx < l(indx(3)).cgx)
155                     lf(2).qx = [l(k).qx l(indx(3)).qx];

```

```

156         lf(2).qt = [l(k).qt l(indx(3)).qt];
157     end                                     %if(l(k).cgx > l(indx(3)).cgx)
158 end
159 lf = calc_nov_par(lf);                     %Calcula os parametros linhas candidatas
160 for j = 1:length(lf),                       %Calcula os coef de dispersao
161     Δf(j) = sum((lf(j).rho - lf(j).qx*cos(lf(j).alpha) - ...
162         lf(j).qt*sin(lf(j).alpha)).^2)/length(lf(j).qx);
163 end                                         %for j = 1:2,
164
165 [minmo, indlf] = min(Δf);                   %Escolhe a reta com menor dispersao
166 if(sqrt(minmo) < limite)                   %Se for menor que o limite
167     verif(k) = 1;                           %Marca o vetor para identifica
168     lt(length(lt)+1) = lf(indlf);          %A linha atual e substituida
169     if(indlf == 1)
170         %Rotina para atualizacao da nova lista de retas
171         lt(length(lt)+1) = l(indx(3));
172     elseif(indlf == 2)
173         lt(length(lt)+1) = l(indx(2));
174     end                                     %if(indlf == 1)
175     clear l;
176     l = lt;
177     Nl(m) = Nl(m) - 1;                       %Decresce o numero de retas
178 else
179     verif(k) = 0;
180 end                                         %if(sqrt(minmo) < limite)
181 if (max(verif(1:k)) == 0)                   %Verifica se ocorreu algum
182     %agrupamento dentre a lista de retas
183     fstop=1;                                %Flag para indicar a finalizacao do processo
184 else
185     fstop = 0;
186 end                                         %if (max(verif) == 0)
187 end                                         %for k = 1: Nl(m),
188 end                                         %while(fstop == 0)
189
190 % %% -- Fim da fase de agrupamento de linhas -- %%
191 %
192 %% Levantamento de todas as linhas em funcao do espaco _____
193
194 for kk = 1:length(l),
195     dum(kk) = l(kk).cgx;
196 end
197 [dumm,ord] = sort(dum);                     %% Ordena a linha em relacao ao espaco
198 clear lf;
199 lf(1:Nl(m)) = l(ord);                       %% Atualiza a estrutura de linhas
200
201
202 %%% Calculo dos novos parametros da reta _____
203
204 function linha_nov = calc_nov_par(linha)
205
206     linha_nov = linha;
207     for icon = 1:length(linha),
208         linha_nov(icon).cgx = sum(linha(icon).qx)/length(linha(icon).qx);

```

```

209     linha_nov(icon).cgt = sum(linha(icon).qt)/length(linha(icon).qt);
210     Sx(icon) = sum((linha(icon).qx - linha_nov(icon).cgx).^2);
211     St(icon) = sum((linha(icon).qt - linha_nov(icon).cgt).^2);
212     Sxt(icon) = sum((linha(icon).qx - linha(icon).cgx).*(linha(icon).qt - ...
213         linha(icon).cgt));
214     linha_nov(icon).alpha = .5*atan(-2*Sxt(icon)/(St(icon) - Sx(icon)));
215     linha_nov(icon).rho = linha_nov(icon).cgx*cos(linha_nov(icon).alpha) + ...
216         linha_nov(icon).cgt*sin(linha_nov(icon).alpha);
217     end
218
219
220     %%%  == Fim do algoritmo == %%%

```

## II.9 mqphbr.m

```

1  function [a,b,W] = mqphbr(X, Y, coini, colen, nint)
2
3  %%% Estimacao dos coeficientes da reta y= ax +b atraves
4  %%% do metodo dos minimos quadrados ponderados
5  %%%           ES = inv(TH' W TH) TH'W Y
6  %%%
7  %%% Setembro 2005 - Frederico Xavier de Melo
8
9  checkx = size(X);    % Verifica tamanho do vetor X
10 checky = size(Y);    % Verifica tamanho do vetor Y
11
12 if (checkx(2) > 1 && checky(2) > 1)
13     Y = Y';          % Corrige a posicao de Y
14     X = X';          % Corrige a posicao de X
15 elseif (checkx(2) ≠ checky(2) && checkx(1) ≠ checky(1))
16     disp('ERRO!!! Vetores de dimensoes diferentes');
17     return;
18 elseif (checkx(2) ≠ 1 && checky(2) ≠ 1)
19     disp('ERRO!!! Vetores de entrada informados incorretamente');
20     return;
21 end
22
23 % Se o indice de estimacao for maior que os vetores
24 if ((coini+colen) > length(X))
25     disp('ERRO!!! Indice de estimacao separada excede tamanho dos vetores');
26     return;
27 end
28
29 nro_int = nint;
30
31 %%% Montagem do sistema linear para reta _____
32 cofb = ones(length(X),1);
33 TH = [X cofb];      % theta
34 W = eye(length(X)); %Pesos iniciais unitarios

```

```

35
36 %% Primeira estimacao por minimos quadrados _____
37 k = 0;
38 j = 0;
39 c =1.345;          % Fator de ponderacao
40 PR = inv(TH'*W*TH)*TH'*W*Y; % Minimos quadrados
41 if(nro_int ≠ 0)    % Inicia iteracoes para calculo do peso
42     for k=0:nro_int,
43         PR = inv(TH'*W*TH)*TH'*W*Y;
44         Res = Y - (PR(1)*X +PR(2)); % Calcula o residuo
45         for j=1:length(Res),
46             wp = inv((1 + Res(j)^2)^2); % Calcula o valor do peso
47             % Atualiza matriz de pesos
48             if( j < coini || j > (coini+colen))
49                 if wp ≤ 1,
50                     W(j,j) = wp;
51                 else
52                     W(j,j) = 1;
53                 end
54             end
55         end
56         k = k+1;
57     end
58 end
59 a = PR(1); % Coeficiente angular
60 b = PR(2); % Deslocamento em X
61
62 %% == Fim do algoritmo ==

```

## II.10 prop\_inc.m

```

1 function P_r = prop_inc(X,T,W,rho,alpha)
2
3 %% Funcao que realiza a propagacao das incertezas sobre a inclinacao da
4 %% reta em coordenadas polares utilizando o metodo proposto por Haralick
5 %%
6 %% Entrada: X -> Pontos no eixo X (km)
7 %%          T -> Pontos no eixo T (seg)
8 %%          W -> Grau de membresia
9 %%          rho -> Raio do segmento medio
10 %%          alfo -> Angulo do segmento medio
11 %%
12 %% Saida: P_r: Matriz de covariancia em coordenadas polares
13 %%
14 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
15 N = length(T); %Determina o tamanho padrao dos vetores
16 sigma_r=.2; %Parametro de dispersao dos dados de entrada
17
18 for i=1:N, %Calcula o residuo e separa os pesos para os pontos suporte

```

```

19     res(i)=rho - X(i)*cos(alpha) - T(i)*sin(alpha);
20     wei(i)=W(i);
21 end
22
23 %% Calculo da variancia relacionada aos residuos da funcao de custo_____
24 c_d = sum(wei.*res.^2/sum(wei));
25
26 %% Matriz de covariancias relativa aos pontos de entrada (X,T)_____
27 C_p11 = sigma_r^2*(cos(atan(T./X))).^2;
28 C_p12 = sigma_r^2*(cos(atan(T./X)).*sin(atan(T./X)));
29 C_p21 = C_p12;
30 C_p22 = sigma_r^2*(sin(atan(T./X))).^2;
31
32 %% Calculo da Matriz de covariancia relacionada aos parametros do segmento
33 %% em coordenadas polares (P_r)_____
34
35 %% Derivada da funcao de custo em relacao aos parametros rho e alpha_____
36 g11= 2*rho - 2*X*cos(alpha) - 2*T*sin(alpha);
37 g21 = 2*X*rho*sin(alpha) - 2*T*rho*cos(alpha) - 2*X.*T - 4*(sin(alpha))^2*X.*T...
38     +sin(2*alpha)*(T.^2-X.^2);
39
40 %Monta o vetor
41 g(1,1) = sum(wei.*g11);
42 g(2,1) = sum(wei.*g21);
43
44 %% Segunda derivada da funcao de custo em relacao a rho e alpha_____
45 dg11_rho=2;
46 dg11_alpha=2*sin(alpha).*X - 2*cos(alpha).*T;
47 dg21_rho = dg11_alpha;
48 dg21_alpha = 2*rho*cos(alpha).*X+2*rho*sin(alpha)*T-4*sin(2*alpha)*X.*T...
49     +cos(2*alpha)*(T.^2-X.^2);
50
51 %Monta a matriz
52 dg(1,1) = sum(wei.*dg11_rho);
53 dg(1,2) = sum(wei.*dg11_alpha);
54 dg(2,1) = dg(1,2);
55 dg(2,2) = sum(wei.*dg21_alpha);
56
57 %% Derivada da funcao g_k em relacao a funcao de custo d(x,t,rho,alpha)_____
58 dg11_x = -2*cos(alpha);
59 dg11_t = -2*sin(alpha);
60 dg21_x = 2*rho*sin(alpha) - 2*T - 4*sin(alpha)^2*T - 2*sin(2*alpha)*X;
61 dg21_t = -2*rho*cos(alpha) - 2*X - 4*sin(alpha)^2*X - 2*sin(2*alpha)*T;
62
63 %% Monta a matriz
64 dg_x(1,1)=sum(wei.*dg11_x);
65 dg_x(2,1)=sum(wei.*dg11_t);
66 dg_x(1,2)=sum(wei.*dg21_x);
67 dg_x(2,2)=sum(wei.*dg21_t);
68
69 %% Calculo do fator lambda_p -> relativo aos parametros rho e alpha_____
70 lambda_p(1,1) = sum(dg_x(1,1)*C_p11*dg_x(1,1));
71 lambda_p(2,2) = sum(dg_x(2,2)*C_p22*dg_x(2,2));

```

```

72 lambda_p(1,2) = sum(dg_x(1,2)*C_p12*dg_x(2,1));
73 lambda_p(2,1) = sum(dg_x(2,1)*C_p21*dg_x(1,2));
74
75 %% Calculo da derivada de g_k em relacao aos pontos de entrada_____
76 dgd(1,1:N)=dg11_rho;
77 dgd(2,:)=dg11_alpha;
78
79 %% Calculo do fator lambda_d -> Relativo a funcao de custo d(x,t,rho,alpha)___
80 lambda_d=0;
81 for i=1:N,
82     lambda_d = lambda_d + dgd*c_d*dgd';
83 end
84
85 %% Calculo da Matriz de covariancia
86 P_r = inv(dg)*(lambda_d+lambda_p)*inv(dg);
87
88 %% == Fim do algoritmo ==

```

## II.11 propagacao\_utfr.m

```

1 %%
2 %% Propagacao de incertezas utilizando transformada unscented para
3 %% conversao de parametros em coordenadas polares para cartesianas.
4 %%
5 %% O algoritmo de transformacao baseou-se no metodo proposto por
6 %% Julier & Uhlmann, 2004
7 %%
8 %% Entrada: Xm -> Media dos pontos em coordenadas polares
9 %%      Px -> Matriz de Covariancia dos pontos em coordenadas polares
10 %%
11 %% Saida: Ym_ut -> Ponto medio correspondente em coord. cartesiana
12 %%      Py_ut -> Matrix de covariancia em coord. cartesiana
13 %%      Ysamples_ut -> Pontos gerados pela transformacao em Y
14 %%      Xsamples_ut -> Pontos gerados pela transformacao em X
15 %%
16 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
17 function [Ym_ut,Py_ut,Ysamples_ut,Xsamples_ut] = propagacao_utfr(Xm,Px);
18     N = 2;
19     alfa = 3-N;
20
21     % Determina os fatores iniciais de propagacao
22     w(1) = 1 / (N+alfa);
23     w(2:2*N+1) = 1 / (2*(N+alfa));
24
25     mquad = sqrtm((N+alfa)*Px);
26
27     % Inicia as variaveis
28     Ym_ut = [0;0];
29     Xsamples_ut = zeros(N,2*N+1);

```

```

30     Ysamples_ut = zeros(N,2*N+1);
31     Py_ut = zeros(2,2);
32
33     % Determina os pontos limites para transformacao
34     Xsamples_ut(:,1) = Xm;
35     Xsamples_ut(:,2) = Xm + mquad(:,1);
36     Xsamples_ut(:,3) = Xm + mquad(:,2);
37     Xsamples_ut(:,4) = Xm - mquad(:,1);
38     Xsamples_ut(:,5) = Xm - mquad(:,2);
39
40     %% Realiza a transformacao de coordenadas
41     for i= 1:(2*N+1),
42         Ysamples_ut(:,i) = [Xsamples_ut(1,i)*cos(Xsamples_ut(2,i));
43                             Xsamples_ut(1,i)*sin(Xsamples_ut(2,i))];
44         Ym_ut = Ym_ut + Ysamples_ut(:,i)*w(i); % Ponto medio (X,Y)
45     end
46
47     %% Calcula a propagacao das incertezas
48     for i = 1:(2*N+1),
49         Py_ut = Py_ut + w(i)*((Ysamples_ut(:,i)-Ym_ut)*(Ysamples_ut(:,i)-Ym_ut)');
50     end
51
52     %% == Fim do algoritmo ==

```

## II.12 mv\_priori.m

```

1  %%
2  %% Rotinas de deteccao da chegada da fase PmP e estimacao dos parametros
3  %% medios da crosta por meio de construcao de grade de solucoes e estimacao
4  %% pelo maximo da verossimilhanca
5  %%
6  %% Entrada: sismog -> Traco sismico
7  %%     linhas -> Segmentos de reta de primeira chegada
8  %%     distc -> Distancia do traco em relacao ao ponto de tiro
9  %%     Δ -> Periodo de amostragem
10 %%     sigmae -> Variancia do erro de estimacao do tempo da PmP
11 %%     scale -> Fator de escala para visualizacao grafica
12 %%     tipo -> Metodo de busca no traco
13 %%     v1_min, v1_max -> Valores minimo e maximo da velocidade da crosta
14 %%     h_min, h_max -> Valores minimo e maximo para espessura da crosta
15 %%
16 %% Saida: v_mv -> Estimativa obtida para velocidade da crosta
17 %%     h_mv -> Estimativa obtida para espessura da crosta
18 %%     S -> Tempos detectados da PmP
19 %%     P_priori -> Matriz de covariancia obtida com a estimacao MV
20 %%
21 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
22 function [v_mv, h_mv, S, P_priori] = mv_priori(sismog, linhas, distc, Δ,...
23         sigmae, scale, tipo,v1_min,...

```

```

24         v1_max, h_min, h_max)
25
26     N = 10; %Nro de amostras
27     S=0;    %Pontos a obter p(S|Theta)
28
29     S_cont=0;
30     S=zeros(2,2);
31     offset = 0.5;
32
33
34     %% Deteccao da fase PmP_____
35
36     % Obter os parametros do segmento que corresponde a Pn
37     [a b] = mqphbr(linhas(2).qx,linhas(2).qt,0,0,50);
38
39     % Inicio da busca
40     for tiro_n=1:length(distc),
41
42         if distc(tiro_n) > 150 & distc(tiro_n) < 180, %Busca dentro do intervalo
43
44             S_cont = S_cont +1;
45             t_inicio(tiro_n) = (a*distc(tiro_n)+b); %Extrapolacao do segmento
46
47             % Funcao de deteccao PmP
48             tempo_cand(tiro_n) = busca_sismog(t_inicio(tiro_n),Δ,2,...
49                                             sismog(:,tiro_n)/max(abs(...
50                                             sismog(:,tiro_n))),tipo);
51
52             % Monta a matriz contendo os pontos detectados
53             S(:,S_cont) = [distc(tiro_n); tempo_cand(tiro_n)];
54         end
55     end
56
57
58     %% Estimacao pelo Maximo da Verossimilhanca_____
59
60     %% Geracao de amostras de theta (v,h) para estimacao -> grade
61     interv_vel = linspace(v1_min,v1_max,200);
62     interv_prof = linspace(h_min,h_max,200);
63
64     ptdados = zeros(length(interv_vel),length(interv_prof));
65
66     %% Inicio da estimacao MV
67     imax = 0; jmax = 0; pmax = 0;
68     % Realiza busca na grade
69     for i=1:length(interv_vel),
70         for j=1:length(interv_prof),
71             % Calcula o residuo de tempo
72             err = S(2,:)-sqrt((S(1,:)/interv_vel(i)).^2+(2*interv_prof(j)/...
73             interv_vel(i)).^2);
74             % Calcula a probabilidade
75             ptdados(i,j) = 1/sqrt(2*pi*sigmae^2)*exp(-0.5*sum((err).^2)/...
76             (sigmae^2));

```

```

77     % Busca pelo valor de ptndados maximo
78     if ptndados(i,j) > pmax
79         pmax = ptndados(i,j);    % Se for maximo, a esetimacao eh o
80         imax = i;                % resultado final
81         jmax = j;
82     end
83 end
84 end
85 v_mv = interv_vel(imax)         %% Valor max para velocidade
86 h_mv = interv_prof(jmax)       %% Valor max para espessura
87
88 %% Calculo das incertezas _____
89
90 % Incerteza marginal - Velocidade
91 vel_marg = sum(ptndados')/sum(sum(ptndados'));
92 pos_vel = find(vel_marg(1:imax) ≤ std(vel_marg));
93 std_v_mv = v_mv - interv_vel(pos_vel(length(pos_vel)));
94
95 % Incerteza marginal - Espessura
96 prof_marg = sum(ptndados)/sum(sum(ptndados));
97 pos_prof = find(prof_marg(1:jmax) ≤ std(prof_marg));
98 std_h_mv = h_mv - interv_prof(pos_prof(length(pos_prof)));
99
100 %% Montagem da matriz de covariancias
101 P_priori = cov(vel_marg,prof_marg);
102 coefcorr = P_priori(1,2)/sqrt(P_priori(1,1)*P_priori(2,2));
103 P_priori(1,1) = std_v_mv^2;
104 P_priori(2,2) = std_h_mv^2;
105 P_priori(1,2) = coefcorr*std_v_mv*std_h_mv;
106 P_priori(2,1) = P_priori(1,2);
107
108
109 %% Resultados graficos _____
110 % Superficie de probabilidade
111 [x y] = meshgrid(interv_prof, interv_vel);
112 figure(7);
113 [super, se]=contourf(x,y,ptndados/sum(sum(ptndados))); % Superficie normalizada
114 hold off
115
116 % Mostra os tracos e os pontos detectados
117 figure(3);
118 veloc_red=7;                %Velocidade de Reducao do traco
119 for tiro_n=1:length(distc),
120     vel_red = distc(tiro_n)/veloc_red;
121     plot(scale*sismog(:,tiro_n)+distc(tiro_n),((1:...
122         length(sismog(:,tiro_n))))*Δ-vel_red);
123     hold on;
124     plot(distc(tiro_n), (sqrt(distc(tiro_n)^2*inv(v_mv^2) +...
125         4*h_mv^2*inv(v_mv^2))-vel_red, 'xr');
126     plot(distc(tiro_n), (a*distc(tiro_n)+b)-vel_red, 'xg');
127 end
128 if veloc_red < Inf,
129     axis([4,distc(tiro_n),0,13]);    %Ajuste dos eixos do grafico

```

```

130     end                                     %caso seja necessario
131     hold off;
132
133     %% == Fim do algoritmo ==
134
135
136
137 %% Funcao de deteccao do tempo de chegada da PmP
138 %%
139 %% Entrada: tempo_analise -> tempo inicio da analise
140 %%     per_amost -> periodo de amostragem
141 %%     janela -> janela de busca
142 %%     traco_analise -> vetor correspondente ao sismograma
143 %%     metodo -> metodo de busca
144 %%
145 %% Saida: tempo -> vetor com os tempos de chegada
146 %%
147 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
148 function tempo=busca_sismog(tempo_analise, per_amost, janela, traco_analise,...
149                             metodo)
150
151     % Definicoes iniciais_____
152     amostra_analise = ceil(tempo_analise/per_amost);
153     janela_analise = ceil(janela/per_amost);
154     i=0;
155     figure(2);
156     plot(traco_analise(amostra_analise:amostra_analise+janela_analise));
157     total = length(traco_analise(amostra_analise:amostra_analise+janela_analise));
158     hold on;
159
160     switch metodo,           % Entra nos metodos de deteccao
161     case 'MAX_VAL'
162         janela_analise_down = ceil(0*janela_analise);
163         janela_analise_up = ceil(.85*janela_analise);
164         [val pos] = max(abs(traco_analise(amostra_analise-...
165                             janela_analise_down:amostra_analise...
166                             +janela_analise_up)));
167         pos = pos+amostra_analise-janela_analise_down;
168         medida=1;
169
170     case 'MAX_ENR'
171         janela_tam = ceil(0.3*janela_analise); % Define o tamanho da janela
172         cont =0; % Contador
173         for i =1:total, % Divide o traco de analise em janelas
174             j_ini = ceil(amostra_analise-0.5*janela_tam+i);
175             j_fin = ceil(amostra_analise+0.5*janela_tam+i);
176             %% Calcula a soma quadratica das amostras dentro da janela
177             energia(i) = sum(abs(traco_analise(j_ini:j_fin).^2));
178         end
179         [val pos] = max(energia); % A janela de valor maximo eh escolhida
180         pos = pos+amostra_analise; % Conversao de amostras para tempo(s).
181         medida=energia;
182

```

```

183     case 'SKEW'
184         janela_tam = ceil(.5*janela_analise); % Define o tamanho da janela
185         cont =0; % Contador
186         for i =1:total, % Divide o traco em janelas
187             j_ini = ceil(amostra_analise+i);
188             j_fin = ceil(amostra_analise+janela_tam+i);
189             skewn(i) = sum((traco_analise(j_ini:j_fin)-...
190                 mean(traco_analise(j_ini:j_fin)).^3)/...
191                 ((2*janela_tam-1)*std(traco_analise(j_ini:j_fin))^3);
192             if(abs(skewn(i)) > 0.5) break; end
193         end
194         [val pos] = max(abs(skewn)); % A janela de valor maximo eh escolhida
195         pos = pos +amostra_analise; %Conversao de amostras para tempo(s).
196         medida=skewn;
197
198     case 'KURT'
199         janela_tam = ceil(0.5*janela_analise); % Define o tamanho da janela
200         cont =0; % Contador
201         for i =1:total, % Divide o traco de analise em janelas
202             j_ini = ceil(amostra_analise+i);
203             j_fin = ceil(amostra_analise+janela_tam+i);
204             kurt(i) = sum((traco_analise(j_ini:j_fin)-...
205                 mean(traco_analise(j_ini:j_fin)).^4)/((2*janela_tam-1)*...
206                 std(traco_analise(j_ini:j_fin))^4);
207             if(kurt(i) > 3) break; end
208         end
209         [val pos] = max(kurt); % A janela de valor maximo eh escolhida
210         pos = pos +amostra_analise; % Conversao de amostras para tempo(s).
211         medida=kurt;
212     end
213
214     %% -= Fim do algoritmo -=
215
216     %% Fim do arquivo

```

## II.13 propagacao\_utfr\_2.m

```

1 %%
2 %% Propagacao de incertezas utilizando transformada unscented para
3 %% conversao da inclinacao de retas das coordenadas polar para cartes.
4 %%
5 %% O algoritmo de transformacao baseou-se no metodo proposto por
6 %% Julier & Uhlmann, 2004
7 %%
8 %% Entrada: Xm -> Media dos pontos em coordenadas polares
9 %%          Px -> Matriz de Covariancia dos pontos em coordenadas polares
10 %%
11 %% Saida: Ym_ut -> Velocidade (km/s)
12 %%        Py_ut -> Variancia da velocidade

```

```

13 %%           Ysamples_ut -> Pontos gerados pela transformacao em Y
14 %%           Xsamples_ut -> Pontos gerados pela transformacao em X
15 %%
16 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
17 function [Ym_ut,Py_ut,Ysamples_ut,Xsamples_ut] = propagacao_utfr2(Xm,Px);
18     N = 1;
19     alfa = 3-N;
20
21     % Determina os fatores iniciais de propagacao
22     w(1) = 2 / (N+alfa);
23     w(2:2*N+1) = 1 / (2*(N+alfa));
24
25     mquad = sqrt((N+alfa)*Px);
26
27     % Inicia as variaveis
28     Xsamples_ut = zeros(N,2*N+1);
29     Ysamples_ut = zeros(N,2*N+1);
30     Py_ut = 0;
31     Ym_ut = 0;
32
33     % Determina os pontos limites para transformacao
34     Xsamples_ut(1) = Xm;
35     Xsamples_ut(2) = Xm + mquad(1);
36     Xsamples_ut(3) = Xm - mquad(1);
37
38     %% Realiza a transformacao de valor
39     for i= 1:(2*N+1),
40         Ysamples_ut(i) = cos(Xsamples_ut(i))/sin(Xsamples_ut(i));
41         Ym_ut = Ym_ut + Ysamples_ut(i)*w(i);
42     end
43
44     % Calcula a variancia
45     Py_ut = w(i)*((Ysamples_ut(:,i)-Ym_ut)*(Ysamples_ut(:,i)-Ym_ut)');
46
47 %% == Fim do algoritmo ==

```

## II.14 sir.m

```

1 %%
2 %% Funcao de estimacao bayesiana utilizando o metodo SIR -
3 %% Sampling Importance Resampling - para reduzir o efeito
4 %% produzido pela discretizacao do espaco de solucoes com
5 %% a construcao de grades na estimacao MV.
6 %%
7 %% Entrada -> vet_dados - registros
8 %%           par_theta - Vetor dos parametros obtidos na MV
9 %%           C_theta - Matriz de covariancia dos pontos
10 %%           POP - Populacao das amostras que serao geradas
11 %%           sigmaet - erro atribuido para o grau de dispersao dos pontos

```

```

12 %%
13 %% Saida -> Distribuicao dos pontos de acordo com a populacao escolhida
14 %%      (vel_pthetat, prof_thetat)
15 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
16 function [vel_pthetat, prof_pthetat] = sir(vet_dados, par_theta, C_theta, POP,...
17      sigmaet)
18
19 %% Inicio das variaveis_____
20 vel_pthetat=zeros(POP,1);
21 prof_pthetat=zeros(POP,1);
22 POP_R = ceil(0.002*POP);
23 vel_q=zeros(POP_R,1);
24 prof_q=zeros(POP_R,1);
25
26 %% Geracao das amostras_____
27 for npop=1:POP,
28     for j=1:POP_R,
29         popq_theta = par_theta + chol(C_theta)'*randn(2,1);
30         vel_q(j) = popq_theta(1);
31         prof_q(j) = popq_theta(2);
32     end
33
34
35     %% Realizacao da MV para uma populacao amostral dos pontos gerados
36     for nq=1:POP_R,
37         et = vet_dados(2,:) - sqrt((vet_dados(1,:)/vel_q(nq)).^2+...
38             (2*prof_q(nq)/vel_q(nq)).^2);
39         q(nq) = 1/sqrt(2*pi*(sigmaet^2))*exp(-0.5*sum((et).^2)/(sigmaet^2));
40     end
41     q = q/sum(q);           % Normalizacao
42     qcum = cumsum(q);      % Soma cumulativa
43     u = rand(1);          % Geracao de uma VA uniforme
44
45     % A selecao das amostras eh feita utilizando estatistica em comparacao com
46     % uma variavel uniforme
47     for nq=1:POP_R,
48         if (qcum(nq)≤u) & (u<qcum(nq+1)),
49             break
50         end
51     end
52     vel_pthetat(npop) = vel_q(nq);           %% Distribuicao dos ptos de velocidade
53     prof_pthetat(npop) = prof_q(nq);        %% Distribuicao dos ptos de espessura
54 end
55
56 %% == Fim do algoritmo ==

```

# 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](#)