



Número: 413/2010

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS

DANIEL LEAL MACEDO

Uma proposta de método de análise de velocidade em  
seções sísmicas de ponto médio comum baseada no  
paradigma de espalhamento de amplitudes

Dissertação apresentada ao Instituto de Geociências como parte  
dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Geociências.

**Orientador:** Prof. Dr. Rodrigo de Souza Portugal

**Co-orientador:** Prof. Dr. Jörg Dietrich Wilhelm Schleicher

CAMPINAS - SÃO PAULO

Março - 2010

**Catálogo na Publicação elaborada pela Biblioteca  
do Instituto de Geociências/UNICAMP**

Macedo, Daniel Leal.

M151u Uma proposta de método de análise de velocidade em seções sísmicas de ponto médio comum baseada no paradigma de espalhamento de amplitudes / Daniel Leal Macedo-- Campinas,SP.: [s.n.], 2010.

Orientador: Rodrigo de Souza Portugal, Joerg Dietrich Wilhelm Schleicher  
Dissertação (mestrado) Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Geociências.

1. Geofísica. 2. Método sísmico de reflexão. 3. Espalhamento. I. Portugal, Rodrigo de Souza. II. Schleicher, Joerg Dietrich Wilhelm. III. Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Geociências. IV. Título.

Título em inglês. A proposal on common mid-point seismic section velocity analysis based on amplitude smearing paradigm.

Keywords: - Geophysics;  
- Seismic reflexion methods..  
- Smearing.

Área de concentração: Geologia e Recursos Naturais

Titulação: Mestre em Geociências.

Banca examinadora: - Joerg Dietrich Wilhelm Schleicher;  
- Jesse Carvalho Costa;  
- Armando Zaupa Remacre.

Data da defesa: 10/03/2010

Programa de Pós-graduação em Geociências



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS NA  
ÁREA DE GEOLOGIA E RECURSOS NATURAIS

**AUTOR:** Daniel Leal Macedo

“Uma proposta de método de análise de velocidades em seções sísmicas de ponto médio comum baseado no paradigma de espalhamento de amplitudes”

**ORIENTADOR:** Prof. Dr. Rodrigo de Souza Portugal

**CO - ORIENTADOR:** Prof. Dr. Joerg Dietrich Wilhelm Schleicher

Aprovada em: 10 / 03 / 2010

**EXAMINADORES:**

Prof. Dr. Joerg Dietrich Wilhelm Schleicher

- Presidente

Prof. Dr. Jesse Carvalho Costa

Prof. Dr. Armando Zaupa Remacre

Campinas, 10 de março de 2010.

“Nem se pense que haja sempre novidades para exprimir; é uma ilusão dos parvos ou ignorantes acreditarem que possuem tesouros de originalidade, e que aquilo que pensam, ou dizem, nunca foi antes pensado, ou dito por ninguém.”

*Fernandes Pinheiro*

“Repetir repetir — até ficar diferente.  
Repetir é um dom do estilo.”

*Manoel de Barros*

---

# Agradecimentos

---

Este trabalho significa muito para mim. Muito mais que apenas uma etapa necessária e importante para a obtenção do meu título de mestre, é a materialização de um desejo de mudança radical em minha vida que somente pessoas próximas à mim podem avaliar sua dimensão. A estas pessoas quero muito agradecer.

Aos meus pais, Carlos e Hélia, devo minha vida. Não só pelo fato de terem me trazido à ela, mas, também, me ensinado a encará-la de frente. Agradeço pelos princípios e caráter que pude aprender com eles, pelas oportunidades que me proporcionaram e pelo sentimento aprendido que não as podia desperdiçar. Obrigado por estarem lá quando procurei e, principalmente, quando precisei. A vontade de fazer com que vocês se orgulhem de mim, tanto quanto me orgulho de de vocês foi um dos motores que me mativeram firmes nesta jornada. Meu amor por vocês é infinito.

Aos meus irmãos, Karla e Eduardo, agradeço por me fazerem sentir especial com um simples olhar de admiração que dispensavam a mim, sem saber que eles foram, e sempre serão, fontes de inspiração para mim. Me orgulho muito de tê-los como irmãos. Amo vocês.

Com o Professor Rodrigo Portugal, tenho uma dívida que só uma amizade verdadeira pode pagar. Foi ele que, mesmo com muitas razões para não acreditar em mim, o fez. Abriu as portas da academia, me ensinando os primeiros passos no mundo da pesquisa científica. Espero ter estado a altura de sua confiança.

Agradeço ao Professor Jörg por ter se mostrado sempre disponível e interessado em contribuir com meu trabalho, seja com importantes comentários, novas idéias, ou com “simples” encorajamento, o que muito me ajudou a compreender e desenvolver meu espírito científico e criativo.

A Anita, agradeço cada minuto de suporte, carinho, felicidade, diversão, cuidado, aprendizado e amor destes últimos meses em que estivemos juntos. Seus olhos enxergaram algo que, por um momento, não pude ver: o quão grande eu poderia ser. Só quem é maior ainda poderia ter feito isso.

Agradeço aos mais que colegas, amigos, Jadsom e Luis, ou melhor, JJ e Akiles. Pude aprender com eles muito do que não se aprende nas salas de aulas, seja sobre geofísica, programação, ou

---

amizade. Espero que nossa cooperação se mantenha por muito tempo; e a amizade, por mais ainda.

Aos meus professores, que tive o prazer de encontrar durante o caminho, agradeço a dedicação e atenção dispensada.

Aos colegas e amigos que fiz no LIG, Ari, José Nayro, Ricardo, Luis Fernando, Juliana, Alexandre, Bruno, e Letícia, obrigado pelo tempo empenhado em nossos seminários e discussões.

Aos funcionários do IG, em especial, Val, Maria Gorete e Helena, agradeço pelo apoio indispensável.

Finalmente, gostaria de agradecer ao IG pelo apoio institucional e ao CNPq pela bolsa de estudos.

---

# Súmula curricular

---

## Formação

- Licenciatura em Física, Universidade Estadual de Campinas - Unicamp, Campinas, SP, Brasil, 2004.
- Bacharelado em Física, Universidade Estadual de Campinas - Unicamp, Campinas, SP, Brasil, 2006.
- Mestrado em Geociências (área de concentração: Geofísica Aplicada), Universidade Estadual de Campinas - Unicamp, Campinas, SP, Brasil, em andamento.

## Experiência Acadêmica e Profissional

- Apresentação de trabalho no *Wave Inversion Technology (WIT) consortium 13th annual meeting*. Hamburgo, 24 a 26 de Fevereiro de 2010.
- Apresentação de trabalho no *Society of Exploration Geophysicists (SEG) 79th annual meeting*. Houston, 26 a 30 de Outubro de 2009.
- Apresentação de trabalho no 11<sup>o</sup> Congresso Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica (SBGf). Salvador, 24 a 28 de Agosto de 2009.
- Participação no 10<sup>o</sup> Congresso Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica (SBGf). Rio de Janeiro, Setembro de 2007.
- Atividades de docência em ensino médio e cursos pré-vestibulares. 1998 à 2007.
- Coordenação Adjunta (vice-presidência) da Cooperativa do Saber. 2001 à 2002.
- Coordenação da área de Física da Cooperativa do Saber. 1999 à 2000.
- *Influência do acoplamento sincro-bétatron na perturbação de órbita do anel de armazenamento de elétrons UVX do LNLS*. Trabalho de Iniciação científica. Campinas: LNLS, 1997. Orientador: Prof. Dr. Pedro Tavares.

---

## Produção Acadêmica e Profissional

- MACEDO, D., FIGUEIREDO J.J.S., PORTUGAL, R.S., SCHLEICHER, J. *Velocity analysis using the smearing paradigm*. Resumo expandido em *WIT 13th annual meeting*, 2010.
- MACEDO, D., FIGUEIREDO J.J.S., PORTUGAL, R.S. *Velocity analysis on CMP section based on the smearing paradigm*. Resumo expandido em *SEG 79th annual meeting*, 2009.
- MACEDO, D., FIGUEIREDO J.J.S., PORTUGAL, R.S. *Velocity analysis on CMP section based on the smearing paradigm*. Resumo expandido no 11<sup>o</sup> Congresso Internacional da SBGf, 2009.
- FARIAS, R.H.A., JAHNEL, L.C., LIN, L., MACEDO, D., RAFAEL, F.S., RODRIGUES A.R.D. TAVARES P.F. *Orbit Measurements and Correction in the LNLS Synchrotron Light Source*. In: 1997 Particle accelerator conference, 1997, Vancouver, Canadá.
- MACEDO, D. et al. *Apostila de Física: Frente de óptica e ondas*. Campinas: Cooperativa do Saber, 2002. 30 módulos.

---

# Índice

---

Agradecimentos	vii
Súmula curricular	ix
Lista de Figuras	xiii
Resumo	xix
Abstract	xxi
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Aquisição sísmica e suas configurações . . . . .	1
1.2 Imageamento e análise de velocidade . . . . .	3
<b>2 Análise de velocidade: fundamentos teóricos</b>	<b>11</b>
2.1 Sobretempo normal . . . . .	13
2.1.1 Refletor plano . . . . .	15
2.1.2 Sub-superfície estratificada com refletores horizontais e planos . . . . .	16
2.1.3 Refletor plano inclinado . . . . .	18
2.1.4 Sub-superfície multicamadas com refletores planos de inclinações arbitrárias	19
2.2 Análise de velocidade baseadas nas técnicas NMO . . . . .	20
2.2.1 Técnicas no domínio do tempo de trânsito . . . . .	21
2.2.2 Técnicas no domínio do espectro de velocidade . . . . .	22
2.2.3 Medidas de coerência . . . . .	25
<b>3 Proposta e implementação</b>	<b>29</b>
3.1 Análise de velocidade no paradigma de espalhamento . . . . .	30
3.1.1 Famílias de hipérbolas . . . . .	30
3.1.2 Métodos de espalhamento . . . . .	33
3.1.3 Medidas de coerência e construção do espectro de velocidades . . . . .	38
3.2 Outros tópicos da implementação . . . . .	43
3.2.1 Região não espalhada . . . . .	43
3.2.2 Abertura mínima . . . . .	44

3.2.3	Janela temporal . . . . .	46
<b>4</b>	<b>Modelos e resultados</b>	<b>49</b>
4.1	Modelo 1 . . . . .	49
4.2	Modelo 2 . . . . .	59
<b>5</b>	<b>Conclusões</b>	<b>77</b>
<b>A</b>	<b>Aproximação hiperbólica para o tempo de trânsito</b>	<b>81</b>
<b>B</b>	<b>Funções e algoritmos implementados</b>	<b>85</b>
<b>C</b>	<b>Painéis do Modelo 2</b>	<b>95</b>
	<b>Referências bibliográficas</b>	<b>107</b>

---

# Lista de Figuras

---

1.1	Exemplo de um experimento sísmico com uma fonte (F) e um receptor (G), ambos localizados na superfície (profundidade 0 m). Define-se como afastamento $x$ a distância entre a fonte e o receptor. O ponto M é o ponto médio entre F e G. A distância entre a fonte (ou receptor) e o ponto médio é definida como meio-afastamento $h$ . . . . .	3
1.2	Exemplos de configurações de aquisição. Em todos os exemplos o meio é considerado homogêneo. ACIMA: levantamento com afastamento comum. MEIO: tiro comum. ABAIXO: ponto médio comum. . . . .	6
1.3	Dados sintéticos gerados para diferentes configurações de aquisição mostradas na Figura 1.2. ACIMA: levantamento com afastamento comum. MEIO: tiro comum. ABAIXO: ponto médio comum. . . . .	7
1.4	Esquema de levantamento 2D terrestre de tiro comum durante um dos experimentos sísmicos. . . . .	8
1.5	Visão de topo do “cubo” 3D de dados multicobertura de um levantamento 2D. Na figura são mostrados os eixos das coordenadas de ponto médio e afastamento. . . . .	8
1.6	A escolha de traços para compor a seção sísmica segue regra que depende da configuração de aquisição desejada. ACIMA: seção CO. MEIO: seção CS. ABAIXO: seção CMP. . . . .	9
2.1	Resumo das técnicas de análise de velocidade. O ramo da análise de velocidades por migração não é abordado. . . . .	12
2.2	ESQUERDA: seção CMP não corrigida. A diferença entre o tempo de trânsito registrado e o tempo ZO é o sobretempo normal. MEIO: seção CMP com correção NMO. DIREITA: traço empilhado a partir da seção CMP corrigida. . . . .	14
2.3	Experimento sísmico em um meio homogêneo com um refletor horizontal e plano. Neste caso, conceitos da óptica geométrica podem ser usados para o cálculo do tempo de trânsito de um evento de reflexão. Para tanto, usa-se o teorema de Pitágoras para relacionar as grandezas mostradas na figura. . . . .	16
2.4	Modelo estratificado da subsuperfície. Em cada camada, os meios são homogêneos. Extraído de Castle (1994). . . . .	17

2.5	Refletor inclinado. $S$ representa a fonte, enquanto $G$ , o receptor. $M$ é o ponto médio entre $S$ e $G$ . Note-se que o ponto de reflexão para afastamento nulo, $D'$ , é diferente daquele para afastamento não-nulo, $D$ . Extraído de Yilmaz (2003). . . . .	18
2.6	Sub-superfície multicamadas com refletores planos e inclinados. $S$ representa a fonte, enquanto $G$ , o receptor. $M$ é o ponto médio entre $S$ e $G$ . Note-se que, também aqui, o ponto de reflexão para afastamento nulo, $D'$ , é diferente daquele para afastamento não-nulo, $D$ . Extraído de Yilmaz (2003). . . . .	19
2.7	Método das inclinações. Figura extraída de Yilmaz (2003). . . . .	22
2.8	ACIMA: seção CMP original com 4 eventos de reflexão. ABAIXO: painéis com correções NMO para diferentes velocidades. Com base nesses painéis, é possível escolher as velocidades que horizontalizam cada um dos eventos. . . . .	23
2.9	Transformação de uma seção sintética contendo três eventos de reflexão do domínio CMP para o domínio VS. Cada traço na seção (b) é o resultado do emplilhamento dos traços da seção CMP (a) após a correção NMO com a correspondente velocidade constante. Extraído de Yilmaz (2003). . . . .	24
2.10	Esquema da construção do painel de coerência no domínio VS. Com $t_0$ fixo, escolhe-se uma velocidade, que define um tempo de trânsito hiperbólico, e efetua-se a correção. Uma vez corrigidos, os traços servem de dados de entrada para o filtro escolhido que fornecerá, como dado de saída, um valor de coerência entre esses traços. Quanto mais alinhados, maior o valor de saída do filtro. Utiliza-se esse esquema para diferentes $v_{NMO}$ e diferentes $t_0$ . Figura extraída de Taner and Koehler (1969). . . . .	26
3.1	Cada ponto no domínio VS corresponde a uma curva no domínio CMP. . . . .	31
3.2	Cada ponto no domínio CMP corresponde a uma curva no domínio VS. . . . .	32
3.3	Uma família de hipérbolas, mostrada em (a), que se cruzam em um dado ponto no domínio CMP. Cada hipérbole do domínio CMP mostrada em (a) pode ser associada a um ponto no domínio VS (b), representada por um círculo da mesma cor. . . . .	33
3.4	(a): Evento de reflexão hiperbólico no domínio CMP. (b): Curvas de espalhamento no domínio VS. Cada hipérbole no domínio VS é representada por um círculo no domínio CMP. . . . .	34

3.5	Ilustração da regra de interpolação. Pontos marcados por cruces e pequenos círculos cheios representam aqueles em que a curva de espalhamento cruza a malha. Pontos marcados por quadrados e círculos vazios representam aqueles que receberam valores durante o espalhamento. . . . .	35
3.6	Aproximação (curva azul) para o cálculo do comprimento local $\Delta s$ (curva vermelha). . . . .	37
3.7	Em cada um dos pontos do domínio CMP é mostrado o comprimento da hipérbole de espalhamento correspondente. Esse domínio CMP tem as mesmas dimensões usadas em um dos modelos de teste que serão descritos no Capítulo 4. . . . .	40
3.8	Comprimentos das curvas de espalhamento associadas aos pontos sobre possíveis eventos de reflexão. Cada gráfico exibe os comprimentos normalizados (linha grossa) correspondente ao evento de mesma cor na Figura 3.7. Nesta figura, são mostrados os três primeiros. A linha fina representa o valor médio $\bar{s}$ . O eixo horizontal mostra o número de pontos sobre a curva. . . . .	41
3.9	Continuação da Figura 3.8. Nesta figura são mostrados os três últimos eventos da Figura 3.7. . . . .	42
3.10	(a): Pontos no domínio CMP; o ponto 3 está na região que não terá suas amplitudes espalhadas. (b): Curvas de espalhamento no domínio VS. . . . .	44
3.11	(a): Hipérbole de um evento de reflexão no domínio CMP e curvas de espalhamento correspondentes no domínio VS. (b): Mesmo evento, com abertura mais larga. Cada hipérbole no domínio da direita é representada por um círculo no domínio da esquerda. . . . .	45
3.12	(a): Eventos de reflexão no domínio CMP. Todos os eventos mostrados correspondem a curvas com a mesma velocidade, porém, com tempos ZO diferentes (b): Pontos no domínio VS correspondentes aos eventos assinalados no domínio CMP. . . . .	47
4.1	Modelo 1. Na figura estão mostradas as velocidades sísmicas e espessuras de cada camada. . . . .	50
4.2	Dados sintéticos sem ruído usados na análise de velocidade por espalhamento do Modelo1. . . . .	50
4.3	Dados sintéticos gerados a partir do modelo 1 com ruído tal que $SNR = 2$ . . . . .	51
4.4	(a): Painel A. (b): Painel A2. . . . .	52
4.5	(a): Painel A'. (b): Painel A2'. . . . .	53
4.6	(a): Painel M. (b): Painel C. . . . .	54
4.7	Espectro de velocidades do Modelo 1 com <i>semblance</i> por espalhamento. Os círculos marcam as velocidades RMS e os tempos ZO teóricos. . . . .	55

4.8	Espectro de velocidades do Modelo 1 com <i>semblance-like</i> por espalhamento. . . . .	55
4.9	Espectro de velocidades do Modelo 1 com <i>semblance</i> por empilhamento. . . . .	56
4.10	Espectro de velocidades do Modelo 1 com <i>semblance</i> por espalhamento. Partes com falsos valores foram retiradas e painel normalizado. . . . .	56
4.11	Espectro de velocidades do Modelo 1 com <i>semblance</i> por empilhamento. Partes com falsos valores foram retiradas e painel normalizado. . . . .	57
4.12	Espectro de velocidades do Modelo 1 com <i>semblance-like</i> por espalhamento. Painel normalizado. . . . .	57
4.13	Painel normalizado resultante da multiplicação de S' e Sl. . . . .	58
4.14	Painel normalizado resultante da multiplicação de S' e Sl. Os valores dos picos de coerência estão marcados por um 'X'; valores teóricos para $t_0$ e $v_{RMS}$ , por um círculo. . . . .	58
4.15	Modelo 1. Na figura estão mostradas as velocidades sísmicas e espessuras de cada camada. . . . .	60
4.16	(a):Dados sintéticos sem ruído usado na análise de velocidade por espalhamento do Modelo 2. (b): Dados sintéticos produzidos a partir do Modelo 2 com $SNR = 20$ . . . . .	61
4.17	Dados sintéticos do Modelo 2. (a): $SNR = 1$ . (b): $SNR = 0.5$ . Os dados com $SNR = 20$ podem ser visto no Apêndice C (Figura 4.16b). . . . .	62
4.18	(a): Correlação cruzada não-normalizada. (b): Quadrado das amplitudes empilhadas. Ambos painéis foram construídos por espalhamento a partir do Modelo 2 com $SNR = 1$ . . . . .	66
4.19	painéis A2 do Modelo 2. (a): $SNR = 20$ . (b): $SNR = 1$ . (c): $SNR = 0.5$ . . . . .	67
4.20	Espectros de velocidade do Modelo 2 para $SNR = 0.5$ . (a):correlação cruzada não-normalizada. (b): quadrado das amplitudes espalhadas. . . . .	68
4.21	Painéis “com cortes” com <i>Semblance</i> por espalhamento do Modelo 2. (a): $SNR = 1$ . (b): $SNR = 0.5$ . . . . .	69
4.22	espectros de velocidades “com cortes” com <i>semblance</i> com janela temporal de 20 ms do Modelo 2. (a): $SNR = 1$ . (b): $SNR = 0.5$ . . . . .	70
4.23	<i>Semblance-like</i> do Modelo 2. (a): $SNR = 1$ . (b): $SNR = 0.5$ . . . . .	71
4.24	<i>Semblance</i> por empilhamento “com cortes” do Modelo 2. (a): $SNR = 1$ . (b): $SNR = 0.5$ . . . . .	72
4.25	Multiplicação dos painéis S' por Sl. (a): $SNR = 1$ . (b): $SNR = 0.5$ . . . . .	73
4.26	Multiplicação dos painéis S por Sl. (a): $SNR = 1$ . Neste caso a janela temporal é de 20 ms. (b): $SNR = 0.5$ . Neste caso a janela temporal é de 28 ms. . . . .	74

4.27	Multiplicação dos painéis S por Sl, $SNR = 1$ . Os valores dos picos de coerência estão marcados por um 'X'; valores teóricos para $t_0$ e $v_{RMS}$ , por um círculo. . . . .	75
4.28	Comparação entre o tempo de trânsito hiperbólico ou “Dix” (linha tracejada) e aquele real (linha cheia). Figura retirada de Castle (1994). . . . .	75
5.1	Proposta de formato da janela temporal. (a) Janela temporal no domínio CMP. Note que a janela proposta é mais próxima da janela com “largura” constante que aquela implementada neste estudo. (b) Janela temporal no domínio VS. . . . .	78
A.1	Modelo de subsuperfície com duas camadas homogêneas delimitadas por interfaces planas e horizontais. . . . .	81
C.1	painéis A do Modelo 2. (a): $SNR = 20$ . (b): $SNR = 1$ . (c): $SNR = 0.5$ . . . . .	95
C.2	painéis A2 do Modelo 2. (a): $SNR = 20$ . (b): $SNR = 1$ . (c): $SNR = 0.5$ . . . . .	96
C.3	painéis A' do Modelo 2. (a): $SNR = 20$ . (b): $SNR = 1$ . (c): $SNR = 0.5$ . . . . .	97
C.4	painéis A2' do Modelo 2. (a): $SNR = 20$ . (b): $SNR = 1$ . (c): $SNR = 0.5$ . . . . .	98
C.5	(a): Painel M. (b): Painel C. Ambos para o Modelo 2. . . . .	99
C.6	Espectros de velocidade do o Modelo 2 para $SNR = 20$ . (a): correlação cruzada não-normalizada. (b): quadrado das amplitudes espalhadas. . . . .	99
C.7	<i>Semblance</i> por espalhamento, sem corte, do Modelo 2 com $SNR = 20$ . . . . .	100
C.8	<i>Semblance</i> por espalhamento do Modelo 2 sem corte. (a): $SNR = 1$ . (b): $SNR = 0.5$ . . . . .	101
C.9	Espectros de velocidades “sem cortes” com <i>semblance</i> com janela temporal de 20 ms do Modelo 2. (a): $SNR = 1$ . (b): $SNR = 0.5$ . . . . .	102
C.10	Espectros de velocidades “sem cortes” com <i>semblance</i> com janela temporal de 12 ms do Modelo 2. (a): $SNR = 1$ . (b): $SNR = 0.5$ . . . . .	103
C.11	Espectros de velocidades “sem cortes” com <i>semblance</i> com janela temporal de 28 ms do Modelo 2. (a): $SNR = 1$ . (b): $SNR = 0.5$ . . . . .	104
C.12	<i>Semblance-like</i> do Modelo 2. $SNR = 20$ . . . . .	105
C.13	<i>Semblance</i> “sem cortes” para $SNR = 20$ do Modelo 2. . . . .	105
C.14	<i>Semblance</i> por empilhamento “sem cortes” do Modelo 2. (a): $SNR = 1$ . (b): $SNR = 0.5$ . . . . .	106



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
Pós-Graduação em Geociências

**Titulo: Uma proposta de método de análise de velocidade em seções sísmicas de ponto médio comum baseada no paradigma de espalhamento de amplitudes**

**RESUMO**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**Autor: DANIEL LEAL MACEDO**

Técnicas que usam dados sísmicos organizados em famílias de ponto médio comum (CMP), como correção de sobretempo normal (NMO), empilhamento e análise de velocidade, estão no núcleo do processamento sísmico. Elas são combinações de procedimentos que se baseiam na física, processamento de sinais e leis básicas da estatística. Em geral, todas elas prespõem a existência de um modelo de velocidades do qual derivam-se expressões para o tempo de trânsito e esquemas numéricos para alcançar seus objetivos. Como exemplo, tem-se espectros de velocidade, os quais são tradicionalmente construídos somando-se as amplitudes – empilhando-se – ao longo de hipérboles parametrizadas pelo tempo de afastamento nulo e velocidade sísmica. Neste trabalho foi mostrado que os mesmos espectros obtidos pelo processo convencional, ou seja, de empilhamento, podem ser construídos por aquele de espalhamento. Além disso, modificando-se ligeiramente o processo de espalhamento, outros tipos de espectros de velocidade podem ser obtidos. Nos experimentos numéricos realizados, alguns desses espectros de velocidade alternativos apresentaram picos de velocidade mais destacados.

**Palavras chaves:** Geofísica, métodos sísmicos de reflexão, espalhamento.



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
Pós-Graduação em Geociências

**Title: A proposal on common mid-point seismic section velocity analysis based on amplitude smearing paradigm**

**ABSTRACT**

**MASTER DEGREE DISSERTATION**

**Author: DANIEL LEAL MACEDO**

Techniques that use seismic data sorted in Common Mid-Point (CMP) gathers, such as normal moveout (NMO) correction, stacking and velocity analysis are at the core of seismic processing. They are a combination of procedures that rely on physics, signal processing and the basic laws of statistics. In general, they all use an underlying velocity model, which gives a travelttime expression, and numerical schemes to accomplish their goals. For instance, velocity spectra are traditionally constructed by summing up – stacking – amplitudes along auxiliary hyperbolae, which are parameterized by zero-offset time and seismic velocity. In this work, we demonstrate that the same velocity spectra obtained by the conventional stacking procedure can be constructed by the smearing one. Moreover, by slightly modifying the smearing process, other types of velocity spectra can be obtained. In our numerical experiments, some of these alternative velocity spectra showed more distinctive velocity peaks.

**Key-words:** Geophysics, seismic reflexion methods, smearing.

---

# 1 Introdução

---

Grande parte da geofísica dedica-se ao estudo do interior da Terra por métodos físicos aplicados na superfície dela. Entre os vários métodos empregados para este objetivo, a sísmica tem um papel fundamental.

Métodos sísmicos utilizam princípios similares aos da ecografia. Eles baseiam-se na propagação de energia em forma de ondas elásticas ou acústicas na Terra causadas por fontes naturais (terremotos) ou artificiais (explosões, vibradores, etc.) que geram ondas sísmicas. Estas ondas, ao se propagarem encontram diferentes formações geológicas com diferentes propriedades petrofísicas, como, por exemplo, diferentes velocidades de propagação e densidade. Esses contrastes entre propriedades causam reflexões destas ondas que retornam à superfície e podem ser registradas e armazenadas para posterior processamento.

O tempo que a onda leva da fonte até o *receptor*, chamado de *tempo de trânsito*, e a *amplitude* registrada no mesmo carregam consigo informações sobre as posições dos contrastes e propriedades petrofísicas das rochas que compõem a subsuperfície estudada, ou seja, a partir do conhecimento dos primeiros é possível estimar estes últimos.

Cada receptor, ou grupo de receptores, grava a intensidade da onda sísmica durante um certo tempo após a detonação da fonte. Os dados resultantes desse registro recebem o nome de *traços sísmicos*.

## 1.1 Aquisição sísmica e suas configurações

Os dados sísmicos consistem em um conjunto de traços normalmente obtidos a partir de experimentos<sup>1</sup> constituídos por uma fonte e de receptores (geofones ou hidrofones). Caso se realize vários experimentos sísmicos nos quais se variam as posições das fontes e/ou dos receptores sobre uma mesma área de estudo de modo que estes se sobreponham, os dados gerados são conhecidos como *dados de multicobertura* (Schleicher et al., 2007). Para fins de processamento, esse conjunto de dados pode ser organizado em subconjuntos chamados de *seções sísmicas*, que são montadas e nomeadas segundo alguma regra que define a relação entre os pares fonte-receptor. A esta regra

---

<sup>1</sup>A estes, dá-se o nome de *experimentos sísmicos*.

que define a seção sísmica dá-se o nome de *configuração de aquisição sísmica*.

A distância entre a fonte (F) e o receptor (G) durante um experimento sísmico é chamado de *afastamento*  $x$  (ver Figura 1.1). A distância entre o *ponto médio* (M) do afastamento e a fonte (ou receptor) é chamado *meio-afastamento*  $h$ . No exemplo da Figura 1.1, onde o meio em que a onda se propaga é homogêneo, superfície da Terra e refletor são considerados horizontais e planos, o *ponto de reflexão* (R) está na vertical que passa pelo ponto médio. Estes conceitos são usados na definição das configurações de aquisição. A seguir, estão listadas as mais comuns. Na Figura 1.2 são esquematizado as três primeiras configurações.

**Seção de tiro comum - CS**, do inglês “common shot”, consiste em traços onde a posição da fonte é fixa e cada traço corresponde ao sinal captado por diferentes geofones em diferentes posições;

**Seção de afastamento comum - CO**, do inglês “common offset”, coleciona os traços resultantes de um levantamento onde fonte e receptor são deslocados na mesma direção, mantendo-se uma distância fixa entre eles;

**seção de ponto médio comum - CMP**, do inglês “common midpoint”, consiste em traços produzidos num levantamento no qual fonte e geofone são deslocados por distâncias iguais em direções opostas a partir de um ponto médio em comum;

**seção de receptor comum - CR**, do inglês “common receiver”, é formada por traços nos quais o geofone é fixo e a fonte se desloca ao longo do levantamento;

**seção de afastamento nulo - ZO**, do inglês “zero offset”, seção onde os traços seriam resultado de um levantamento no qual fonte e geofone ocupariam a mesma posição. Como, na prática, é impossível ter fonte e receptor na mesma posição, essa seção não pode ser gerada em campo sendo, na verdade, um dos produtos básicos do processamento convencional.

Na Figura 1.3 são mostrados dados simulados, também chamados de *dados sintéticos*, para as três configurações mostradas na Figura 1.2 para o modelo de um meio homogêneo com um refletor.

É importante notar que durante a aquisição pode ser usada uma configuração e, no processamento, outra, ou seja, a partir do conjunto de dados levantados em campo é possível reorganizá-lo segundo a configuração desejada. Por razões econômicas e de logística, na aquisição multicober-tura é usada a configuração CS. Um exemplo é mostrado a seguir.

Na Figura 1.4, observa-se o esquema de levantamento 2D com uma configuração CS. Este tipo de levantamento é feito com uma linha de receptores e uma fonte. O experimento é dito

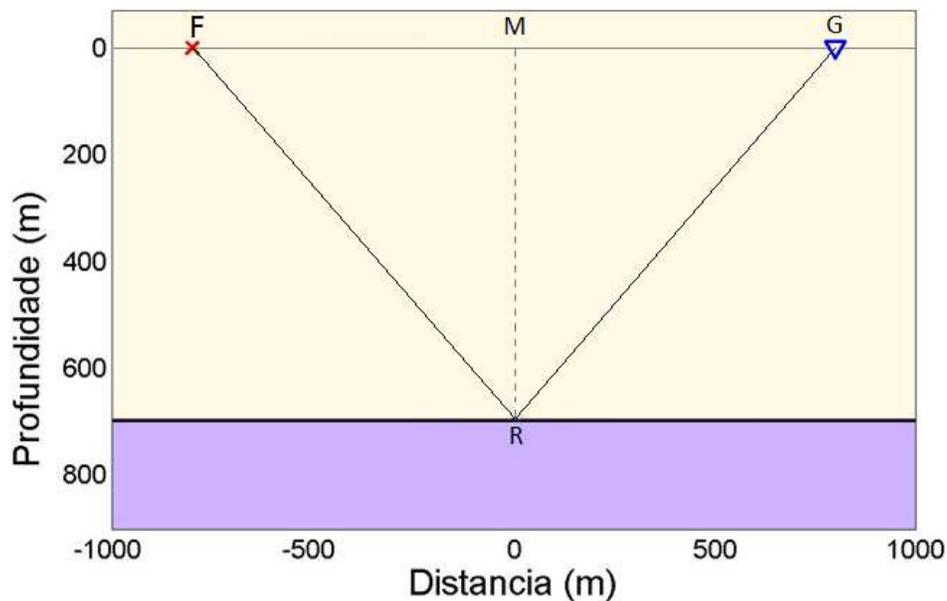


Figura 1.1: Exemplo de um experimento sísmico com uma fonte (F) e um receptor (G), ambos localizados na superfície (profundidade 0 m). Define-se como afastamento  $x$  a distância entre a fonte e o receptor. O ponto M é o ponto médio entre F e G. A distância entre a fonte (ou receptor) e o ponto médio é definida como meio-afastamento  $h$ .

2D pois a seção sísmica representa, de certa forma, um corte vertical da subsuperfície. Cada tiro da fonte produzirá uma seção sísmica com coordenadas de tempo e afastamento. Ao final do levantamento, feito com a fonte em diferentes posições para cada tiro, tem-se um conjunto de seções sísmicas 2D as quais, reunidas, formam um “cubo” 3D de dados com coordenadas de tempo, ponto médio e afastamento, constituindo os dados multicobertura deste levantamento (Gonzalez-Serrano and Claerbout, 1984). A Figura 1.5 mostra este cubo visto da perspectiva perpendicular ao plano das coordenadas do ponto médio e do afastamento.

Uma vez organizados na forma mostrada na Figura 1.5, basta selecionar os traços segundo a configuração desejada (veja a Figura 1.6).

## 1.2 Imageamento e análise de velocidade

O objetivo principal tanto da sismologia de terremotos quanto da sísmica de exploração é a reconstrução da melhor imagem possível não distorcida na profundidade a partir de seções

sísmicas, que podem ser vistas como imagens distorcidas da subsuperfície no tempo<sup>2</sup>. Para este objetivo, empregam-se os chamados métodos de imageamento, entre os quais principalmente o da *migração*.

Para a realização deste processo de imageamento, existem várias técnicas sugeridas na literatura, baseadas em operadores diferenciais (Gonzalez-Serrano and Claerbout, 1984) e integrais (Hubral et al., 1996). A indústria de petróleo usa o termo *migração por equação de onda* para as primeiras, enquanto, para as últimas, é usado o termo *migração Kirchhoff*. Em ambos os casos, os algoritmos de migração resolvem aproximações para a mesma equação de onda. Contudo, para a realização da migração a partir dos métodos acima mencionados, é necessário conhecer um *modelo das velocidades* de propagação das ondas no subsolo em consideração, as chamadas velocidades de migração<sup>3</sup>.

Porém, não se conhece o modelo de velocidades *a priori*. O procedimento que, a partir dos dados sísmicos de superfície adquiridos em campo, produz um modelo de velocidades é conhecido por *análise de velocidade (VelAn<sup>4</sup>)*. As primeiras técnicas de análise de velocidade desenvolvidas foram baseadas no *sobretempo normal (NMO<sup>5</sup>)* e produziam velocidades que, apesar de úteis, consistiam em aproximações com certo grau de incerteza. Ao longo do tempo, outras técnicas de análise de velocidades também baseadas no sobretempo normal foram desenvolvidas, melhorando significativamente a qualidade do modelo de velocidades. Este conjunto de técnicas, também conhecido por *análise de velocidade convencional*, tem em comum o fato de ter, como dado inicial, seções sísmicas CMP.

Outro tipo de abordagem na análise de velocidade a partir de dados sísmicos de superfície se baseia em múltiplas seções CO e usa a migração para extrair informações sobre as velocidades sísmicas do subsolo. Também conhecido por *análise de velocidades baseada na migração*, este conjunto de técnicas consegue, por um processo iterativo, aperfeiçoar o modelo de velocidades associado a um conjunto de dados sísmicos. Porém, além de ser um processo caro do ponto de vista computacional, ainda requer um modelo de velocidades inicial que é, em geral, obtido a partir da análise de velocidade convencional.

Por esta razão, técnicas baseadas em dados de *ponto-médio comum*, tais como correção NMO, empilhamento e análise de velocidade convencional, continuam sendo o cerne do processamento sísmico convencional, pois, como dito, seus produtos irão alimentar procedimentos mais críticos

---

<sup>2</sup>Como visto antes, as seções sísmicas são construídas em coordenadas de distância, na horizontal, e de tempo na vertical.

<sup>3</sup>Também são usados os termos *velocidades sísmicas*, *velocidades do meio* ou, simplesmente, *velocidades*.

<sup>4</sup>Do inglês “*Velocity Analysis*”.

<sup>5</sup>D. i. “*Normal Moveout*”.

e avançados. Note-se que erros durante os estágios iniciais do processamento sísmico tendem a se acumular, gerando, assim, refletores mal posicionados e má interpretação geológica.

Todas essas técnicas, em geral, têm em comum o fato de estarem baseadas teoricamente em hipóteses sobre o modelo de subsuperfície, associado a uma expressão para o tempo de trânsito, o qual é obtido a partir de uma combinação de procedimentos que se baseiam na física de ondas e na óptica geométrica. O desenvolvimento da técnica a partir do modelo teórico emprega esquemas numéricos baseados em processamento de sinais, leis básicas da estatística e análise numérica. Como exemplo, o modelo mais simples de análise de velocidade é desenvolvido a partir de um modelo geológico estratificado em camadas homogêneas separadas por interfaces planas e horizontais. A expressão de tempo de trânsito é a fórmula de *tempo de trânsito hiperbólico*, que depende do afastamento e é parametrizada, neste modelo, pela *velocidade quadrática média* – a velocidade RMS<sup>6</sup> – e pelo *tempo de trânsito de afastamento nulo* – o tempo ZO<sup>7</sup>. O tempo de trânsito hiperbólico é usado na análise de velocidade convencional para relizar uma transformação de domínio que permite identificar as velocidades RMS e tempos ZO associados aos eventos de reflexão. Os produtos desta transformação são chamados de *espectros de velocidade*. A partir de alguma medida de coerência os espectros de velocidades são construídos, tradicionalmente, somando-se as amplitudes – *empilhando-se* – ao longo das hipérboles que representam o tempo de trânsito.

Neste trabalho, primeiramente, foi demonstrado que a análise de velocidade baseada no tempo hiperbólico pode ser realizada por procedimentos de *espalhamento* ao invés daqueles de empilhamento. Foi mostrado que os mesmos espectros de velocidade obtidos pelo procedimento convencional de empilhamento também o são por aquele de espalhamento. Além disso, outros tipos de espectros de velocidade podem ser obtidos por métodos de espalhamento ligeiramente diferentes.

No Segundo capítulo, são apresentados os fundamentos teóricos da análise de velocidade convencional: as expressões para o sobretempo normal em meios horizontalmente estratificados, as diversas técnicas de análise de velocidade que utilizam do sobretempo normal e as medidas de coerência mais utilizadas. No terceiro capítulo são apresentadas as bases matemáticas da proposta de análise de velocidade por espalhamento e detalhes de sua implementação. O capítulo quarto é reservado para apresentação dos modelos usados para testar as metodologias propostas e seus resultados. E, por fim, no quinto capítulo são discutidos os resultados e apresentadas as conclusões.

---

<sup>6</sup>D. i. “*Root Mean Squared*”.

<sup>7</sup>D. i. “*Zero Offset*”.

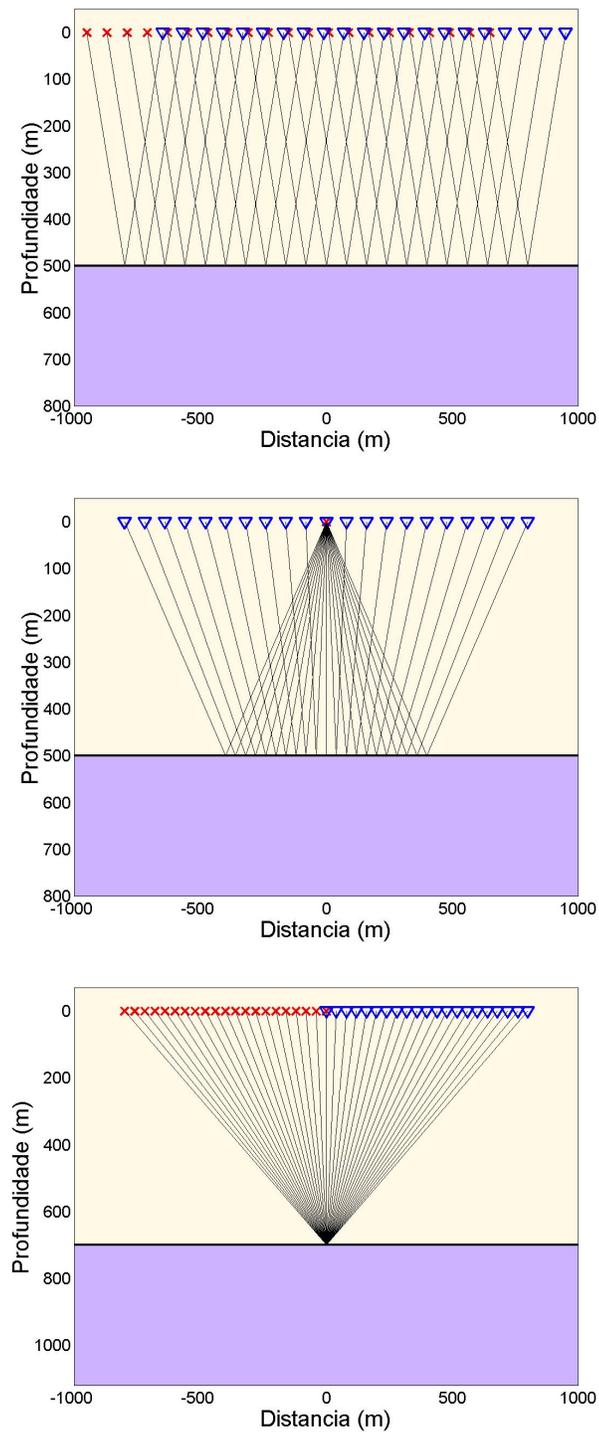


Figura 1.2: Exemplos de configurações de aquisição. Em todos os exemplos o meio é considerado homogêneo. ACIMA: levantamento com afastamento comum. MEIO: tiro comum. ABAIXO: ponto médio comum.

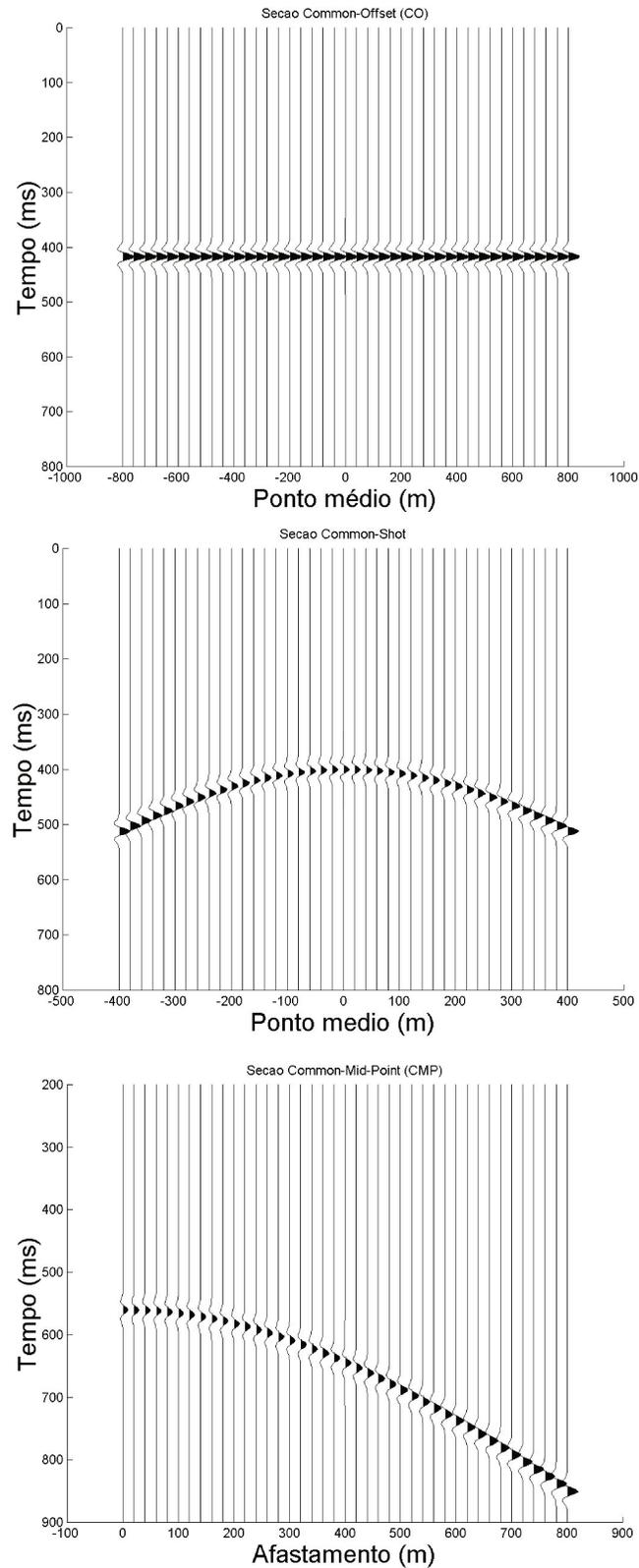


Figura 1.3: Dados sintéticos gerados para diferentes configurações de aquisição mostradas na Figura 1.2. ACIMA: levantamento com afastamento comum. MEIO: tiro comum. ABAIXO: ponto médio comum.

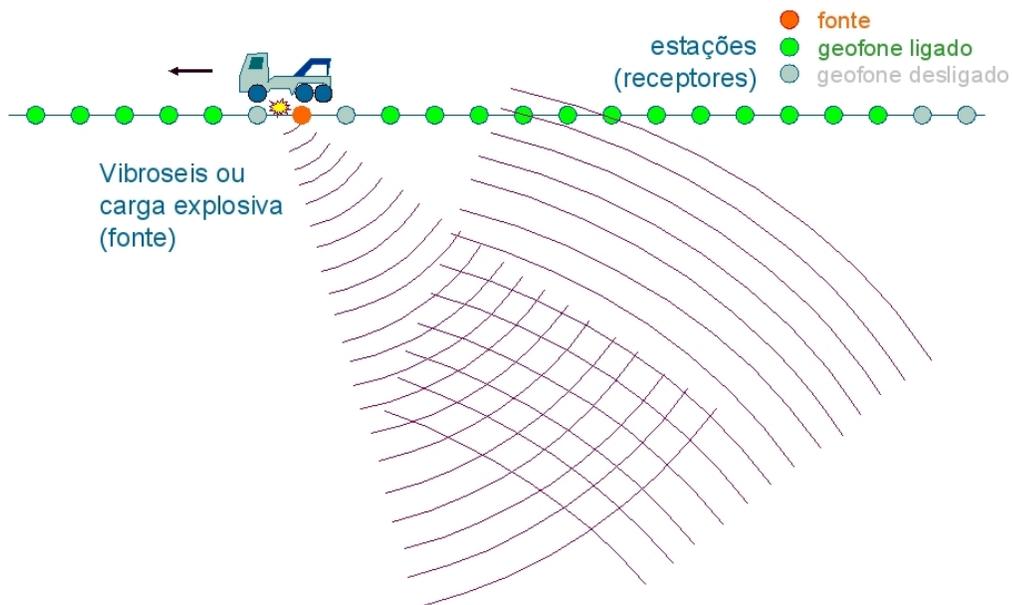


Figura 1.4: Esquema de levantamento 2D terrestre de tiro comum durante um dos experimentos sísmicos.

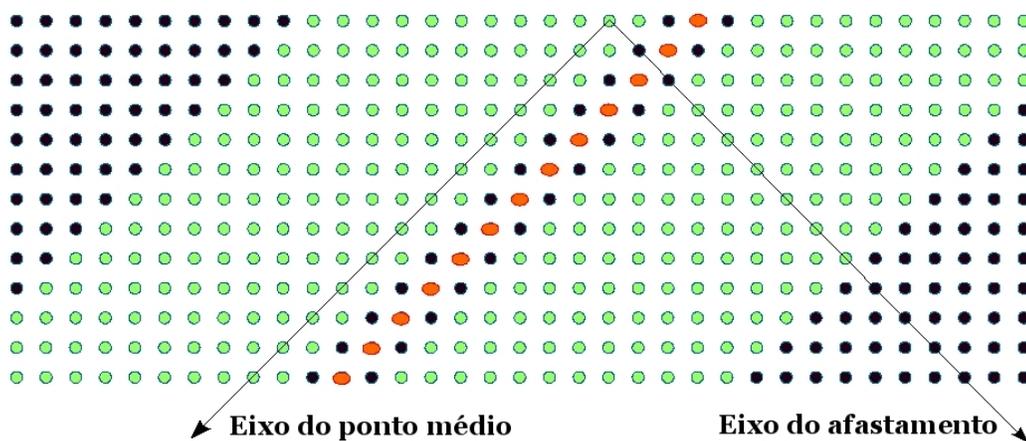


Figura 1.5: Visão de topo do "cubo" 3D de dados multicobertura de um levantamento 2D. Na figura são mostrados os eixos das coordenadas de ponto médio e afastamento.

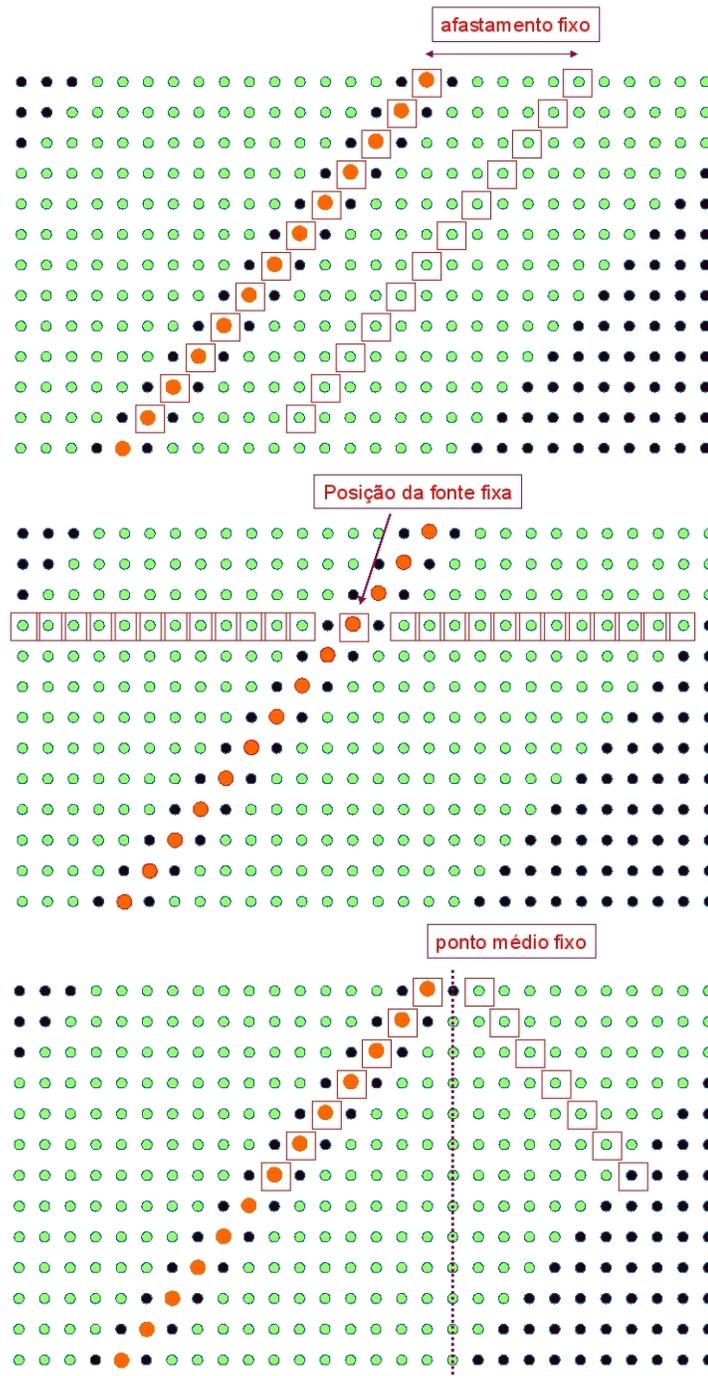


Figura 1.6: A escolha de traços para compor a seção sísmica segue regra que depende da configuração de aquisição desejada. ACIMA: seção CO. MEIO: seção CS. ABAIXO: seção CMP.

---

## 2 Análise de velocidade: fundamentos teóricos

---

O imageamento de subsuperfície apresenta um paradoxo. Quanto melhor for o modelo de velocidades que descreve o subsolo, mais próxima será a imagem, produzida a partir dos dados sísmicos, dos corpos geológicos reais. No limite, se o modelo de velocidades “real” for conhecido, a imagem gerada com o uso deste seria muito próxima do real. Contudo, a que fim serviria a imagem se este modelo que descreve com precisão a subsuperfície já estivesse disponível?

De certa forma, tal paradoxo evidencia que a obtenção do modelo de velocidades pelos geofísicos é uma questão central no processamento sísmico que precisa ser resolvida simultaneamente à obtenção da melhor imagem possível. Em contraposição às medidas de perfilagem sônica que fornecem uma medida direta da velocidade (Yilmaz, 2003), dados sísmicos permitem somente uma medida indireta desta mesma velocidade, realizada pelo processo chamado de análise de velocidade.

Na Figura 2.1, é mostrado um resumo de parte das técnicas de análise de velocidades a partir de dados de reflexão de superfície. Elas podem ser divididas basicamente em dois grupos:

- Técnicas baseadas em seções CMP.
- Técnicas baseadas em seções migradas.

As técnicas mais recentes do primeiro grupo, conhecidas por análise de velocidades convencional, baseiam-se na medida de *coerência* dos dados de uma seção CMP calculada ao longo de curvas de tempo de trânsito das reflexões primárias. Estas curvas são computadas para diferentes velocidades a partir de uma hipótese para a subsuperfície. Essa medida de coerência é quantificada por expressões que fornecem valores tanto maiores quanto mais próximos entre si são os valores da amplitude ao longo da curva de tempo de trânsito em questão. Esta ideia se baseia no fato de que, caso uma curva de tempo de trânsito não corresponda a um evento de reflexão, as amplitudes ao longo dela serão incoerentes entre si e vice-versa.

Tradicionalmente, considera-se o meio multi-camadas, estratificado horizontalmente. Esta hipótese, como será visto, dá origem a tempos de trânsitos aproximadamente hiperbólicos se



Figura 2.1: Resumo das técnicas de análise de velocidade. O ramo da análise de velocidades por migração não é abordado.

consideradas algumas aproximações. Uma delas é calcular o tempo de trânsito considerando-se o caso de pequena abertura máxima.

A robustez das técnicas CMP reside na simetria fonte-receptor de sua configuração. Esta simetria faz com que, para o caso de meios elásticos, a função de tempo de trânsito seja uma função par. Assim, sua expansão por uma série de Taylor só possuirá termos pares. Portanto, mesmo partindo de um hipótese aparentemente irreal para a subsuperfície, o tempo de trânsito hiperbólico, que é uma aproximação de segunda ordem, constitui uma boa aproximação a menos de termos de quarta ordem. Pela mesma razão, as técnicas NMO, também baseadas no tempo hiperbólico, são utilizadas até hoje.

A análise de velocidade a partir de seções CMP apresenta dificuldades quando a hipótese de pequena abertura máxima já não é mais satisfeita. É neste contexto que as técnicas de análise de velocidade baseadas em seções migradas foram desenvolvidas.

As técnicas desse grupo trazem uma nova abordagem para a estimativa de velocidades ao fazer uso de elementos da migração como extrapolação de campos de onda (Gonzalez-Serrano and Claerbout, 1984; Liu and Bleistein, 1995; Sava and Biondi, 2004; Yilmaz and Chambers, 1984), integrais de Kirchhoff (Kim and Gonzalez, 1991) e condições de imageamento estendidas (Sava and Vasconcelos, 2009). Tradicionalmente, estimativa de velocidades e migração são

considerados processos relativamente independentes. No entanto, ambos possuem a mesma base teórica, a saber, a equação de onda. Como os processos de empilhamento e de migração necessitam de um modelo de velocidades, eles, por sua vez, podem ser usados para estimar a velocidade do meio. Vale dizer que, cada vez que o modelo de velocidade se torna mais complexo, a análise de velocidade e a migração se tornam mais interdependentes. Além disso, meios mais complexos exigem maior iluminação nos levantamentos sísmicos, o que, por sua vez, leva a afastamentos maiores nas aquisições sísmicas. Assim, para esse tipo de situação, técnicas baseadas em seções CMP que, como será visto, requerem a hipótese de pequenos afastamentos em relação às profundidades envolvidas, e pouca variação lateral da velocidade no meio, não constituem a melhor opção.

O princípio que une as técnicas deste grupo diz que as imagens migradas pré-empilhamento<sup>1</sup> para diferentes afastamentos serão diferentes entre si caso seja usado um modelo de velocidades errado, pois, caso o modelo de velocidades esteja correto a imagem não deve depender do afastamento usado e imagens de diferentes afastamentos deveriam ser iguais. Avaliando-se iterativamente essas diferenças, pode-se modificar o modelo de velocidades até que ele convirja para um resultado satisfatório, ou seja, modifica-se o modelo de velocidades de modo a minimizar as diferenças entre imagens de diferentes afastamentos.

Como se observa, esse processo é bastante dispendioso do ponto de vista de implementação, pois a migração e o processo iterativo podem ser muito caros computacionalmente. Além disso, não se descarta a necessidade de um modelo de velocidades inicial de boa qualidade, isto é, razoavelmente próximo do real, que ajude no processo de convergência. Portanto, mesmo com a crescente complexidade das novas fronteiras exploratórias, e o surgimento de novas técnicas de análise de velocidade cada vez mais elaboradas, a análise convencional está longe de ser uma ferramenta superada nos estágios iniciais da exploração sísmica.

## 2.1 Sobretempo normal

Os procedimentos convencionais de estimativa de velocidades necessitam de dados adquiridos com afastamentos não nulos fornecidos pelas seções CMP (Yilmaz, 2003). A base da análise de velocidade convencional consiste em corrigir os tempos de trânsito dos eventos de reflexão para afastamentos não nulos em relação àquele de afastamento nulo.

A diferença entre o tempo de trânsito para um certo afastamento e aquele de afastamento nulo

---

<sup>1</sup>A migração pré-empilhamento é feita a partir de seções sísmicas não empilhadas. Na Seção 2.1 é explicado o conceito de empilhamento.

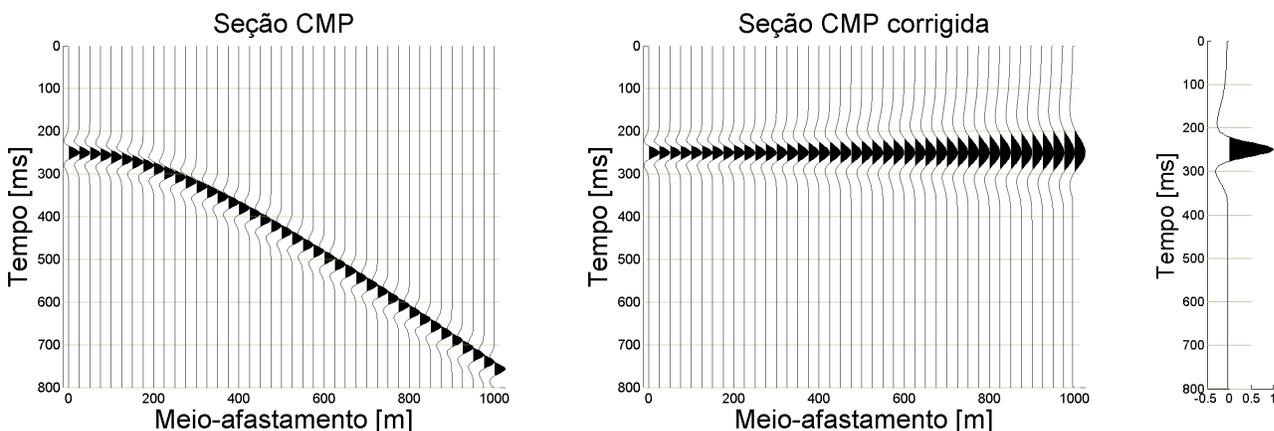


Figura 2.2: ESQUERDA: seção CMP não corrigida. A diferença entre o tempo de trânsito registrado e o tempo ZO é o sobretempo normal. MEIO: seção CMP com correção NMO. DIREITA: traço empilhado a partir da seção CMP corrigida.

é chamado de *sobretempo normal*. A correção a que se refere o parágrafo anterior é chamada de *correção pelo sobretempo normal* ou, como é mais conhecida, *correção NMO*. O propósito desse tipo de correção é horizontalizar os eventos de reflexão numa seção CMP (Liner, 1999). A velocidade necessária para efetuar esta correção é chamada de *velocidade de sobretempo normal* ou *velocidade NMO*. Uma vez feita essa correção é possível realizar o empilhamento dos dados<sup>2</sup>. Cada seção CMP corrigida e empilhada dá origem a um traço empilhado correspondente à posição do ponto médio da seção CMP. Corrigindo, empilhando e reunindo traços empilhados de diferentes seções CMP, com diferentes pontos médios, são produzidas as *seções empilhadas*. Estas seções são a matéria prima para os primeiros procedimentos de migração – a *migração pós-empilhamento*. Na verdade, o processo de empilhamento pode ser feito concomitantemente ao de estimativa de velocidades, fazendo parte de alguns métodos de análise de velocidades (Seções 2.2.1 e 2.2.2). Na Figura 2.2 mostra-se uma seção sísmica sintética sem correção, com a correção NMO e o traço empilhado após a correção.

Vale ressaltar que as velocidades NMO não são as velocidades das camadas, porém, se relacionam com as mesmas. Esta relação depende do modelo de subsuperfície considerado, mas, de todo modo, é a partir do levantamento das primeiras que as últimas serão obtidas. Na seções seguintes serão exploradas tais relações.

Todavia, uma primeira e sutil diferenciação entre *velocidade de empilhamento* e velocidade NMO deve ser feita (Yilmaz, 2003). Será visto mais adiante que, para um modelo estratificado com

<sup>2</sup>Soma dos traços ao longo do eixo dos afastamentos.

refletores horizontais e planos e camadas homogêneas, o tempo de trânsito é, até uma aproximação de segunda ordem, hiperbólico. Nesta situação a velocidade NMO é baseada no tempo de trânsito para pequenos afastamentos (Castle, 1994; Dix, 1955; Taner and Koehler, 1969), enquanto a velocidade de empilhamento é baseada na hipérbole que melhor se ajusta em toda a abertura de afastamentos (essas duas velocidades se confundem no caso de um único refletor em um meio homogêneo, como será visto na Seção 2.1.1). Contudo, no mais das vezes, essas duas velocidades são consideradas equivalentes, e é assim que serão tratadas ao longo deste trabalho – a não ser quando explicitado o contrário.

### 2.1.1 Refletor plano

O primeiro passo para se efetuar a correção NMO é modelar o tempo de trânsito dos eventos de reflexão em função do afastamento. Para tanto, deve-se assumir primeiramente um modelo para a subsuperfície. Se este modelo é complexo, pode-se usar a equação de onda ou teoria de raios dentro de uma aproximação de alta frequência para se calcular o tempo de trânsito; em casos mais simples, entretanto, pode-se usar conceitos de óptica geométrica.

No contexto da sismica de exploração, Green (1938) é reconhecido como o primeiro trabalho a propor um modelo e, a partir deste, uma formulação do tempo de trânsito em função do afastamento. Com base nesta formulação é proposto um método para cálculo da velocidade sísmica de propagação para a subsuperfície rasa ou próxima.

Em seu artigo, Green assume uma aquisição CS em um modelo tal que:

- A subsuperfície deve ser composta de um meio homogêneo acima do refletor;
- a superfície de aquisição deve ser horizontal e plana;
- o refletor deve ser plano e horizontal.

A Figura 2.3 representa tais hipóteses apresentadas. A partir deste modelo, aplica-se o teorema de Pitágoras para relacionar as apresentadas na figura. Então, tem-se

$$\left(\frac{d}{2}\right)^2 = \left(\frac{d_0}{2}\right)^2 + \left(\frac{x}{2}\right)^2, \quad (2.1)$$

onde  $d$  e  $d_0$  se relacionam, respectivamente, com o tempo de trânsito  $t$  para um afastamento  $x$  e com o tempo de trânsito para afastamento nulo  $t_0$  da seguinte forma:  $d = vt$  e  $d_0 = vt_0$ , onde  $v$  é a velocidade de propagação sísmica. Assim, a partir da equação anterior tem-se

$$t^2 = t_0^2 + \frac{x^2}{v^2}. \quad (2.2)$$

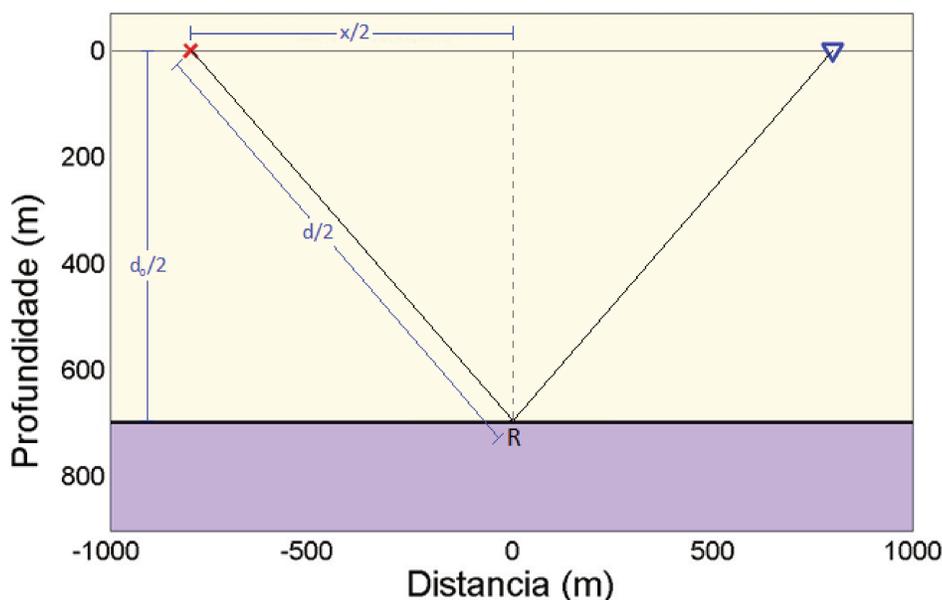


Figura 2.3: Experimento sísmico em um meio homogêneo com um refletor horizontal e plano. Neste caso, conceitos da óptica geométrica podem ser usados para o cálculo do tempo de trânsito de um evento de reflexão. Para tanto, usa-se o teorema de Pitágoras para relacionar as grandezas mostradas na figura.

Portanto a velocidade NMO, neste caso, é a própria velocidade do meio em questão.

No caso de uma seção CMP, o tempo de trânsito também é hiperbólico com a diferença que somente afastamentos ou meio-afastamentos positivos são computados. Segundo Green (1938), esta forma de aquisição faz com que o subsolo raso se aproxime mais facilmente das condições ideais requeridas pelo modelo, principalmente no que diz respeito à hipótese do refletor horizontal plano.

### 2.1.2 Sub-superfície estratificada com refletores horizontais e planos

A partir da Seção 2.1.1, é natural que surja a seguinte pergunta: “Qual é a expressão do tempo de trânsito para um modelo mais complexo constituído de múltiplos refletores planos e horizontais?” (ver Figura 2.4). Uma resposta foi apresentada por Dix (1955), cujo trabalho era um caso especial, mais elementar e, segundo o autor, mais próximo dos problemas de exploração do que a abordagem mais geral primeiramente apresentada por Dürbaum (1954). Dix (1955), a partir das mesmas hipóteses de Green para um refletor, deduz a expressão para dois refletores generalizando, logo em seguida, para um número qualquer destes. No Apêndice A é apresentado

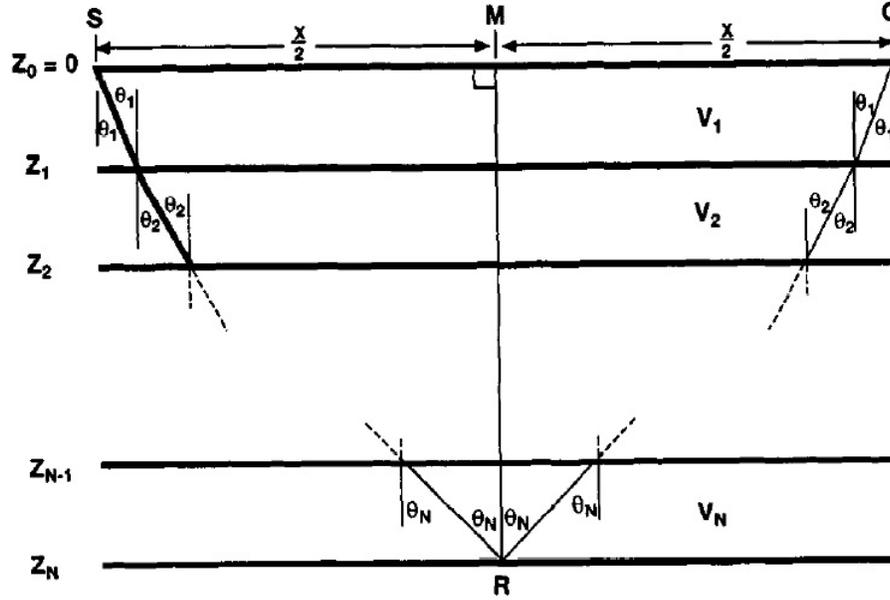


Figura 2.4: Modelo estratificado da subsuperfície. Em cada camada, os meios são homogêneos. Extraído de Castle (1994).

o desenvolvimento que leva ao que será chamado, segundo Castle (1994), *tempo* ou *equação NMO de Dix*:

$$t^2 \approx t_{0n}^2 + \frac{x^2}{v_{Rn}^2}, \quad (2.3)$$

onde  $t$  é o tempo de trânsito de uma reflexão ocorrida no  $n$ -ésimo refletor;  $t_{0n}$ , o tempo ZO até o mesmo refletor;  $x$  é o afastamento; e  $v_{Rn}$ , a velocidade média quadrática ou velocidade RMS das  $n$  camadas acima do refletor.

A velocidade NMO, ou de empilhamento<sup>3</sup>, é a velocidade RMS assim definida:

$$v_{Rn}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n v_i^2 \Delta t_i}{\sum_{i=1}^n \Delta t_i}, \quad (2.4)$$

onde  $v_i$  é a velocidade da  $i$ -ésima camada ou *velocidade intervalar* e  $\Delta t_i$ , a espessura<sup>4</sup>, em tempo, da  $i$ -ésima camada. Como pode ser visto no Apêndice A, a equação (2.3) é uma *aproximação válida para pequenos afastamentos*. Esta é uma importante restrição das técnicas NMO.

Uma vez de posse das sucessivas velocidades RMS de cada refletor é possível, de uma maneira

<sup>3</sup>Não se deve perder de vista a ressalva feita no início da Seção 2.1, segundo a qual, apesar dos conceitos de velocidade NMO e velocidade de empilhamento serem ligeiramente diferentes, estes serão considerados equivalentes.

<sup>4</sup>Define-se  $\Delta t_i$  tal que  $\Delta z_i = \Delta t_i v_i / 2$ , onde  $\Delta z_i$  é a espessura da  $i$ -ésima camada.

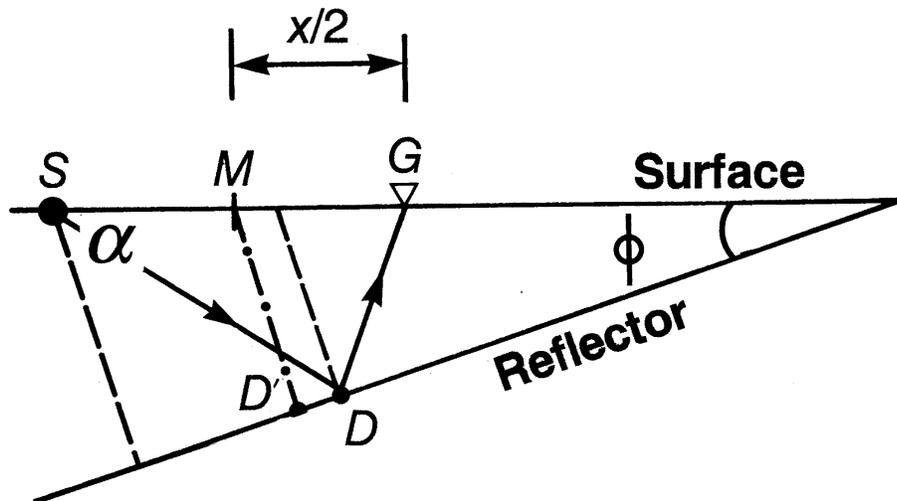


Figura 2.5: Refletor inclinado.  $S$  representa a fonte, enquanto  $G$ , o receptor.  $M$  é o ponto médio entre  $S$  e  $G$ . Note-se que o ponto de reflexão para afastamento nulo,  $D'$ , é diferente daquele para afastamento não-nulo,  $D$ . Extraído de Yilmaz (2003).

recursiva, obter as  $n$  velocidades intervalares através da expressão a seguir conhecida como *fórmula de Dix* (veja Apêndice A):

$$v_n^2 = \frac{(v_{R_n}^2 \sum_{i=1}^n \Delta t_i - v_{R_{n-1}}^2 \sum_{i=1}^{n-1} \Delta t_i)}{\Delta t_n}, \quad (2.5)$$

para  $n > 1$ . Para  $n = 1$ ,  $v_1 = v_{R_1}$ .

### 2.1.3 Refletor plano inclinado

Outra possibilidade a se considerar no modelo para a subsuperfície é a existência de refletores inclinados. A primeira abordagem para o cálculo do tempo de trânsito nessas condições é considerar um único refletor plano e inclinado (veja a Figura 2.5).

Em Levin (1971) encontra-se a derivação a expressão para o tempo de trânsito em função do *ângulo de mergulho*  $\phi$ :

$$t^2 = t_0^2 + \frac{x^2 \cos^2 \phi}{v^2}. \quad (2.6)$$

Conseqüentemente, a velocidade NMO para o caso de um refletor plano e inclinado é

$$v_{NMO} = \frac{v}{\cos \phi} \quad (2.7)$$

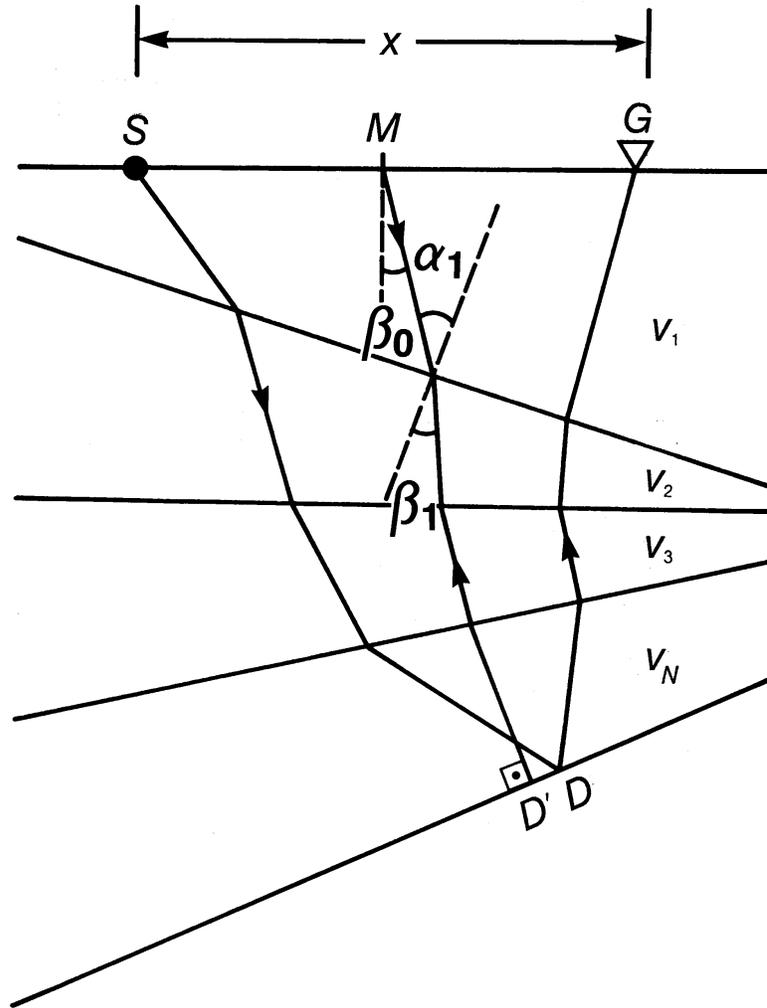


Figura 2.6: Sub-superfície multicamadas com refletores planos e inclinados.  $S$  representa a fonte, enquanto  $G$ , o receptor.  $M$  é o ponto médio entre  $S$  e  $G$ . Note-se que, também aqui, o ponto de reflexão para afastamento nulo,  $D'$ , é diferente daquele para afastamento não-nulo,  $D$ . Extraído de Yilmaz (2003).

#### 2.1.4 Sub-superfície multicamadas com refletores planos de inclinações arbitrárias

Na Figura 2.6, vê-se um esquema de um modelo de subsuperfície multicamadas com refletores planos de inclinações arbitrárias. Este caso é a generalização de todos os casos acima descritos.

Hubral and Krey (1980) derivaram a expressão para o tempo de trânsito neste modelo como

$$t^2 \approx t_0^2 + \frac{x^2}{v_{NMO}^2}, \quad (2.8)$$

onde,

$$v_{NMO}^2 = \frac{1}{t_0 \cos \beta_0} \sum_{i=1}^N v_i^2 \Delta t_i \prod_{k=1}^{i-1} \left( \frac{\cos \alpha_k}{\cos \beta_k} \right). \quad (2.9)$$

Os ângulos  $\alpha_k$ ,  $\beta_k$  e  $\beta_0$  estão definidos na Figura 2.6.  $\Delta t_i$  é a porção do tempo de trânsito de afastamento nulo dentro da  $i$ -ésima camada.

Cabe salientar que tanto neste caso, como no anterior, não é possível estimar a velocidade da camada conhecendo-se somente a velocidade NMO. As técnicas de análise de velocidade apresentadas mais adiante ou ignoram esse fato e assumem o meio horizontalmente estratificado, o que leva, inevitavelmente, a uma estimativa errônea das velocidades sísmicas das camadas, ou só podem ser aplicadas depois que os dados sofrem uma correção para excluir a influência da possível inclinação dos refletores. Essa correção é conhecida como *DMO*<sup>5</sup> (Liner, 1999). Este assunto não será abordado no presente trabalho.

## 2.2 Análise de velocidade baseadas nas técnicas NMO

Na Seção 2.1 foram apresentados os conceitos, hipóteses e expressões que dão origem ao tempo de trânsito hiperbólico usado para efetuar as correções NMO. Nesta seção serão apresentados as técnicas de análise de velocidades convencional baseadas na expressão hiperbólica do sobretempo normal.

De acordo com a Figura 2.1, neste trabalho as técnicas de análise de velocidade convencionais estão divididas em dois grupos:

**Técnicas no domínio do tempo de trânsito** Estas técnicas foram, historicamente, as primeiras a serem usadas e dependem largamente da intervenção e interpretação humana. São executadas no domínio do tempo.

**Técnicas no domínio do espectro de velocidades** Estas técnicas podem ser vistas como uma transformação ou mapeamento dos dados no domínio do tempo para um novo domínio, o das velocidades RMS, chamado de domínio do *espectro de velocidades*. As técnicas mais recentes utilizam medidas de coerência para a identificação dos eventos hiperbólicos associados às reflexões.

Todas as técnicas, porém, possuem o mesmo objetivo: estimar o modelo de velocidades da subsuperfície em função do tempo ZO que permite, a partir da hipótese de um meio horizontalmente estratificado, estimar o modelo de velocidades em função da profundidade.

---

<sup>5</sup>D. i., *dip-moveout*.

### 2.2.1 Técnicas no domínio do tempo de trânsito

A primeira e mais antiga técnica é chamada *método  $x^2 - t^2$*  (Green, 1938). A equação (2.3) fornece uma reta no plano  $x^2 - t^2$ , na qual o intercepto descreve o tempo ZO,  $t_0$ ; e a inclinação, o inverso do quadrado da velocidade RMS,  $1/v_{R_n}^2$ . Assim o intérprete deve:

1. Identificar um ou mais eventos na seção CMP;
2. selecionar pontos sobre cada um desses eventos;
3. plotar os pontos no plano  $x^2 - t^2$ ;
4. ajustar uma reta para cada conjunto de pontos que representa um evento.

A acuidade deste método depende muito da razão sinal-ruído (SNR<sup>6</sup>) que afeta diretamente a qualidade da seleção de pontos (Yilmaz, 2003).

Em Claerbout (1978) é proposto um método manual para extração da velocidades intervalares a partir de seções CMP. A técnica, aqui chamada de *métodos das inclinações*, é esquematizada na Figura 2.7. O método consiste em:

1. Medir a inclinação de duas retas inclinadas e paralelas que são tangentes aos eventos de reflexão que delimitam o intervalo de interesse (inclinação 1);
2. conectar os dois pontos de tangência e medir a inclinação desta segunda reta (inclinação 2);
3. calcular a velocidade intervalar como a raiz quadrada do produto das duas inclinações.

Aqui também a SNR é determinante para a acuidade do método, bem como a habilidade do intérprete.

Um terceiro método de análise de velocidade feito no domínio do tempo é a *varredura com velocidade constante* (Yilmaz, 2003). Este método consiste em, a partir de uma seção CMP, produzir várias seções corrigidas, cada uma delas com uma velocidade constante para toda a seção. A escolha do intervalo de velocidades a ser utilizado e do incremento das mesmas é feito pelo intérprete. Uma vez construído esse conjunto de seções, o interprete deve identificar as diferentes velocidades que horizontalizam os diferentes eventos de reflexão e os tempos ZO correspondentes; construindo, assim, a expressão de velocidade RMS em função do tempo ZO. A Figura 2.8 mostra um exemplo da aplicação deste método em uma seção CMP com 4 eventos.

---

<sup>6</sup>D. i. “*signal-to-noise ratio*”.

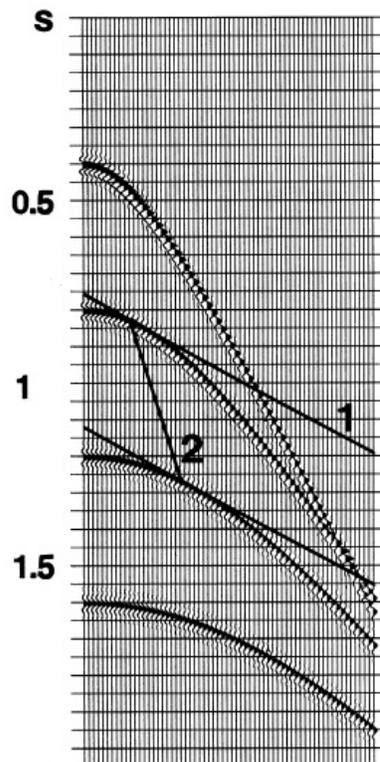


Figura 2.7: Método das inclinações. Figura extraída de Yilmaz (2003).

## 2.2.2 Técnicas no domínio do espectro de velocidade

Os métodos executados no domínio do tempo de trânsito possuem uma limitação em comum: são todos métodos visuais ou gráficos e dependem, portanto, da habilidade do intérprete em reconhecer e analisar os eventos de reflexão. Taner and Koehler (1969) propuseram uma nova maneira de se identificar os eventos de reflexão e estimar as velocidade RMS associadas a eles que minimizam essa limitação.

As seções sísmicas mostram a energia refletida como função de duas variáveis, tempo e distância. No caso de seções CMP, este domínio será chamado de *domínio CMP*. É possível exibir esta energia refletida em um domínio mais conveniente, a saber, tempo ZO e velocidade RMS. Este novo domínio é chamado de *domínio do espectro de velocidades* ou *domínio VS*<sup>7</sup>. Para tanto deve-se, de algum modo, transformar a energia de um domínio, para o outro.

Um exemplo de transformação de um domínio para o outro é o uso do *empilhamento das amplitudes*. O procedimento é simples. A partir de uma seção CMP, procede-se com a correção NMO e o empilhamento, repetidamente, usando-se, para cada correção e empilhamento, uma velocidade constante dentro de um intervalo pré-defindo. Em seguida, deve-se exibir os traços resultantes

<sup>7</sup>D. i., “velocity spectrum”.

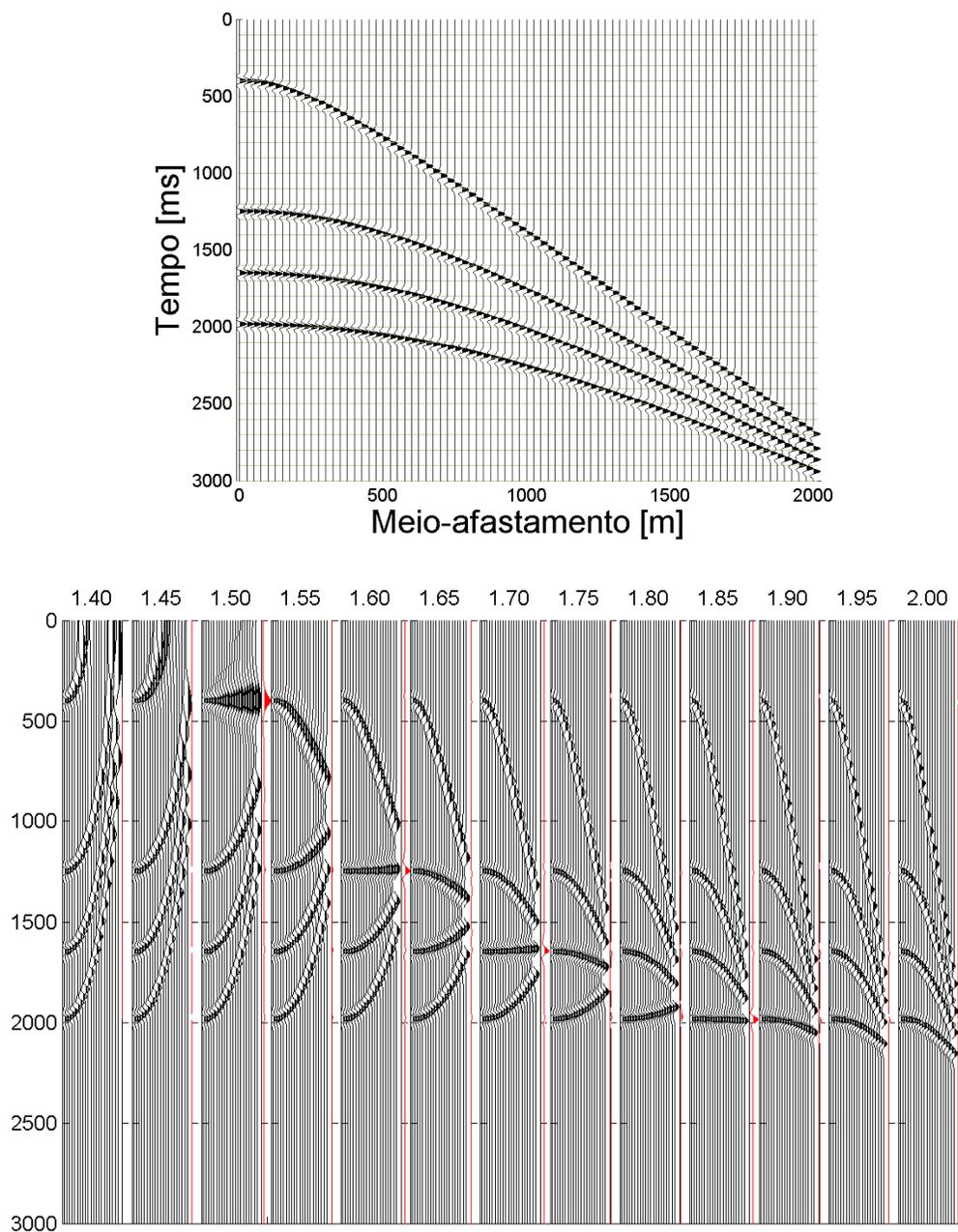


Figura 2.8: ACIMA: seção CMP original com 4 eventos de reflexão. ABAIXO: painéis com correções NMO para diferentes velocidades. Com base nesses painéis, é possível escolher as velocidades que horizontalizam cada um dos eventos.

do empilhamento para cada uma das velocidades lado-a-lado em um plano da velocidade pelo tempo ZO (veja a Figura 2.9).

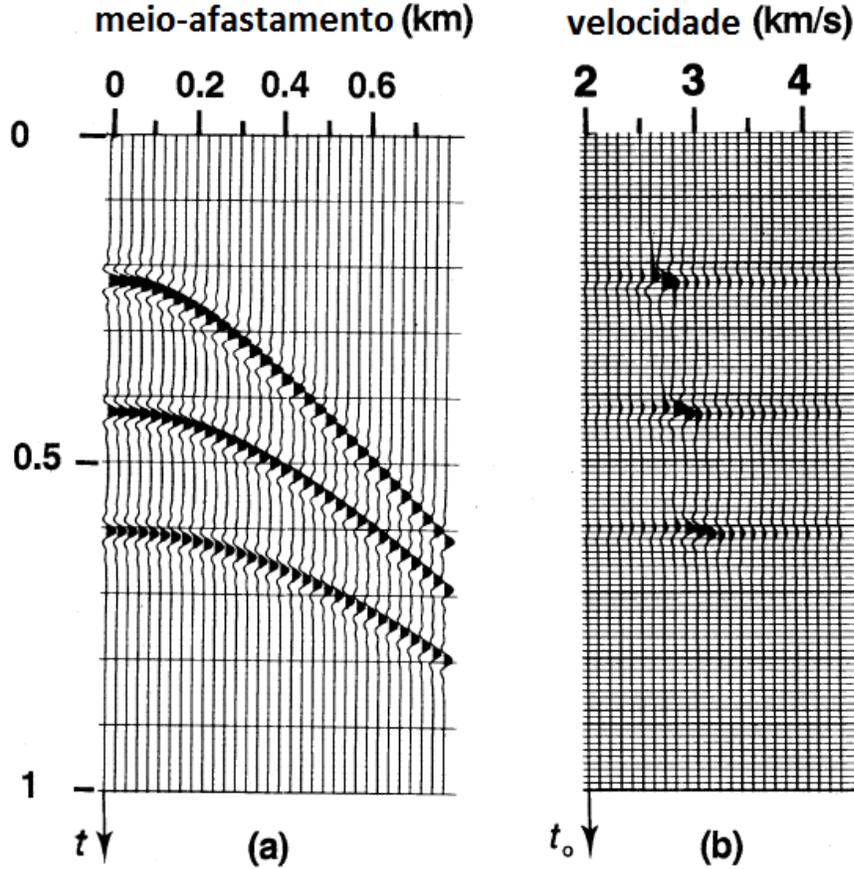


Figura 2.9: Transformação de uma seção sintética contendo três eventos de reflexão do domínio CMP para o domínio VS. Cada traço na seção (b) é o resultado do emplilhamento dos traços da seção CMP (a) após a correção NMO com a correspondente velocidade constante. Extraído de Yilmaz (2003).

Matematicamente, essa transformação pode ser descrita pela expressão abaixo:

$$A(v_{NMO}, t_0) = \sum_{i=1}^m f_i(t_i), \quad (2.10)$$

onde  $f_i(t_i)$  é o valor da amplitude do  $i$ -ésimo traço no tempo de trânsito  $t_i$  e  $m$  é o número de traços na seção CMP. O tempo de trânsito  $t_i$  é descrito pela já conhecida expressão hiperbólica associada a *velocidade NMO de tentativa*<sup>8</sup>:

$$t_i = \sqrt{t_0^2 + \frac{x_i^2}{v_{NMO}^2}}. \quad (2.11)$$

<sup>8</sup>D. i. “trial velocity”.

No domínio VS, os pontos que correspondem às maiores amplitudes empilhadas fornecem os valores que permitem a construção da função  $v_R(t_0)$ , ou seja, velocidade RMS em função do tempo ZO. No caso da Figura 2.9 esta função se resume a três pares de pontos, um para cada refletor.

### 2.2.3 Medidas de coerência

A análise de velocidade baseada na transformação de domínios tem como objetivo, portanto, obter picos no domínio VS que correspondem à melhor coerência do sinal ao longo da trajetória hiperbólica em toda a abertura do afastamento na seção CMP. O empilhamento é uma maneira de medir essa coerência pois os eventos de reflexão, uma vez horizontalizados corretamente, ao serem empilhados se reforçam, enquanto o ruído tende a se anular. Contudo, se a razão sinal-ruído do dado não for razoável, a amplitude empilhada pode não ser a melhor *medida de coerência* (Yilmaz, 2003).

Em Taner and Koehler (1969) e Neidell and Taner (1971) são descritos vários tipos de medidas de coerência ou *filtros de coerência* que podem ser usados para construir os painéis no domínio VS chamados de *painéis de coerência* ou *espectro de velocidades*. Porém, independentemente da medida usada, a construção do painel de coerência no domínio VS segue o mesmo esquema apresentado na Figura 2.10.

O procedimento para a construção do painel de coerência no domínio VS é descrito abaixo:

1. Escolhe-se um tempo ZO  $t_0$  inicial diferente de zero;
2. escolhe-se uma velocidade NMO de tentativa  $v_{NMO}$  dentro do intervalo pré-definido;
3. efetua-se a correção NMO a partir do tempo hiperbólico;
4. usam-se os traços corrigidos como dados de entrada para o filtro de coerência escolhido;
5. associa-se o valor de saída do filtro ao ponto  $(v_{NMO}, t_0)$  no painel de coerência;
6. repete-se os passos 2 à 5 para todas as velocidades NMO de tentativa dentro do intervalo pré-definido;
7. escolhe-se um novo tempo ZO  $t_0$ ;
8. repete-se os passos 2 à 7 para todos os tempos ZO contidos na seção CMP.

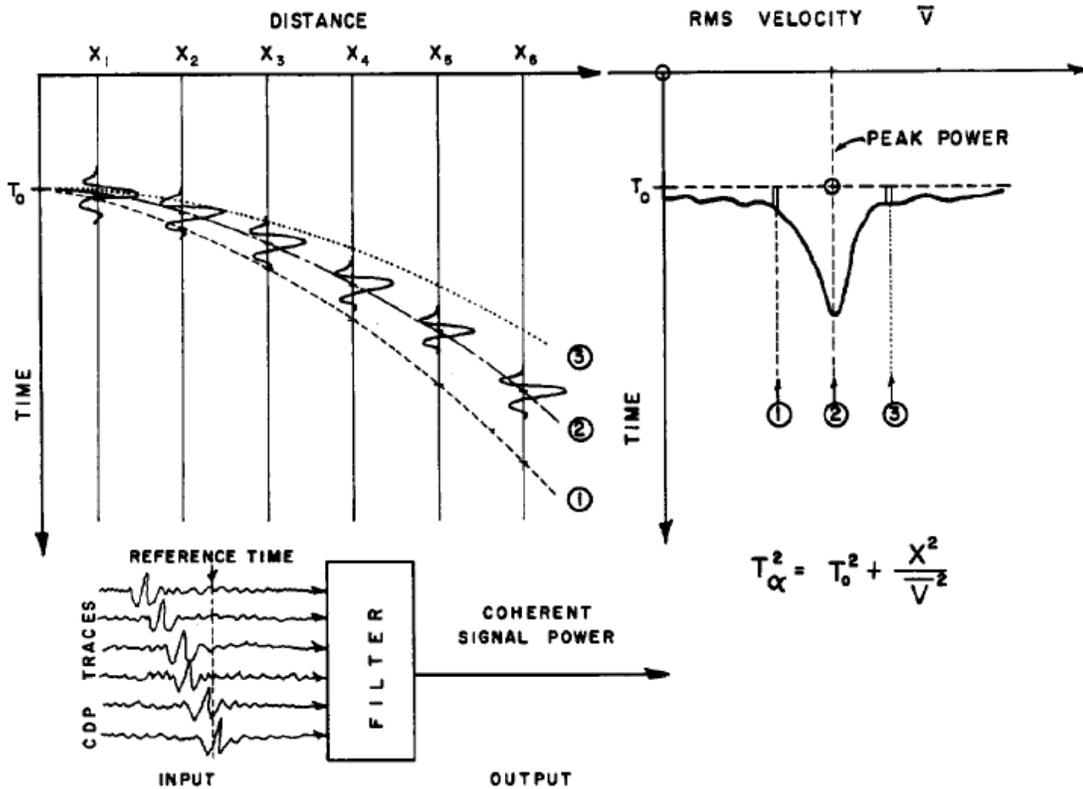


Figura 2.10: Esquema da construção do painel de coerência no domínio VS. Com  $t_0$  fixo, escolhe-se uma velocidade, que define um tempo de trânsito hiperbólico, e efetua-se a correção. Uma vez corrigidos, os traços servem de dados de entrada para o filtro escolhido que fornecerá, como dado de saída, um valor de coerência entre esses traços. Quanto mais alinhados, maior o valor de saída do filtro. Utiliza-se esse esquema para diferentes  $v_{NMO}$  e diferentes  $t_0$ . Figura extraída de Taner and Koehler (1969).

As medidas ou filtros de coerência passam desde o empilhamento de amplitude (A), apresentado na Seção 2.2.2, até o *semblance* (S), que é a medida atualmente mais utilizada. A seguir, são mostradas algumas medidas de coerências encontradas na literatura e suas respectivas referências. Em todas as definições abaixo,  $t_i$  é definido pela equação (2.11).

### Amplitude empilhada (A) (Yilmaz, 2003)

$$A(v_{NMO}, t_0) = \sum_{i=1}^m f_i(t_i) \quad (2.12)$$

**Amplitude empilhada normalizada (NA)** (Yilmaz, 2003)

$$NA(v_{NMO}, t_0) = \frac{\sum_{i=1}^m f_i(t_i)}{\sum_{i=1}^m |f_i(t_i)|} \quad (2.13)$$

**Correlação cruzada (CC)** (Taner and Koehler, 1969)

$$CC(v_{NMO}, t_0) = \sum_t \sum_{\substack{i,j=1 \\ i \neq j}}^m f_i(t+t_i) f_j(t+t_j) \quad (2.14)$$

**Correlação cruzada normalizada (NC)** (Neidell and Taner, 1971)

$$NC(v_{NMO}, t_0) = \frac{2}{m(m-1)} \sum_t \sum_{k=1}^{m-1} \sum_{i=1}^{m-k} \frac{f_i(t+t_i) f_{i+k}(t+t_{i+k})}{\sqrt{\sum_t f_i^2(t+t_i) \sum_t f_{i+k}^2(t+t_{i+k})}} \quad (2.15)$$

**Correlação cruzada com energia normalizada (EC)** (Yilmaz, 2003)

$$EC(v_{NMO}, t_0) = \frac{2 CC(v_{NMO}, t_0)}{(m-1) \sum_t \sum_{i=1}^m f_i^2(t+t_i)} \quad (2.16)$$

**Quadrado das amplitudes empilhadas (E)** (Taner and Koehler, 1969)

$$E(v_{NMO}, t_0) = \sum_t \left[ \sum_{i=1}^m f_i(t+t_i) \right]^2 \quad (2.17)$$

**Semblance (S)** (Neidell and Taner, 1971; Taner and Koehler, 1969)

$$S(v_{NMO}, t_0) = \frac{\sum_t \left[ \sum_{i=1}^m f_i(t+t_i) \right]^2}{m \sum_t \sum_{i=1}^m f_i^2(t+t_i)} \quad (2.18)$$

Todas as medidas acima foram desenvolvidas com base em um problema de maximização. Toma-se como exemplo o filtro E, eq. (2.17). O problema parte da hipótese que em certo número  $m$  de traços  $f_i(t)$ , correspondentes a diferentes valores de  $x$ , todos contenham um sinal comum

$S(t)$  de um mesmo refletor mas chegando em tempos diferentes. Se os traços contiverem somente o sinal e as diferenças de tempo forem  $\tau_i$ , estas últimas poderiam ser achadas teoricamente pela maximização de:

$$E(t_1, t_2, \dots, t_m) = \sum_t \left[ \sum_{i=1}^m f_i(t + t_i) \right]^2. \quad (2.19)$$

O máximo da função seria obtido então para  $t_i = \tau_i$ . Para traços reais contendo ruído, o critério de maximização poderia ainda ser usado como estimativa dos tempos de chegada do sinal coerente. Vale dizer que, posto desta maneira, a resolução do problema poderia fornecer os tempos de trânsito da reflexão para cada um dos diferentes afastamentos  $x_i$  independente de qualquer modelo de tempo de trânsito subjacente. No entanto, para número grande de variáveis, um problema deste tipo pode apresentar complicações numéricas de grande magnitude que seriam resolvidas somente com uma longa série de aproximações sucessivas (Taner and Koehler, 1969). Desse modo, o problema pode ser bastante simplificado se for feita a hipótese de que os tempos de trânsito  $\tau_i$  dependam de um ou dois parâmetros. É justamente neste ponto que entra a necessidade do modelo descrito na Seção 2.1, com o qual se reduz o número de parâmetros do problema, além de permitir a estimativa da velocidade.

---

## 3 Proposta e implementação

---

Grande parte do processo de imageamento tem suas bases teóricas apoiadas em integrais computadas ao longo de curvas auxiliares como, por exemplo, a migração Kirchhoff (Hubral et al., 1996; Tygel et al., 1996) ou a transformada tau-p (Clayton and McMechan, 1981). Na verdade, essas integrais teóricas são a razão de que amplitudes empilhadas (somadas) ao longo de curvas auxiliares forneçam bons resultados, pois, é possível entender o empilhamento das amplitudes com tradução direta das fórmulas teóricas para problemas práticos, nos quais operações de integração se transformam em somas discretas.

Os métodos usuais de análise de velocidade, bem como suas variações e extensões, são todos desenvolvidos sob o mesmo princípio que é, genericamente, conhecido por empilhamento e que pode ser dividido em três partes:

**Localização** considerar uma expressão para o tempo de trânsito que é, geometricamente, equivalente a uma curva (superfície);

**medição** desenvolver/utilizar algum tipo de medida estatística que possua a propriedade desejada como, por exemplo, coerência;

**empilhamento** na intersecção da *localização* e a seção de dados, aplicar a *medição*.

Grosso modo, empilhar é somar os valores encontrados ao longo de uma curva (superfície) e depositar este valor em um ponto. Note-se que esta definição não difere da apresentada na Seção 2.1: fazer a correção dos dados segundo uma curva e depois somá-los na horizontal, é o mesmo que somar ao longo da curva.

O método de empilhamento não é só usado na análise de velocidades. A migração Kirchhoff também utiliza-se deste método. Neste caso, reduzem-se em somas os operadores integrais nos quais a migração se baseia, realizando o imageamento através do empilhamento de amplitudes ao longo de curvas de difração (Schleicher et al., 2007).

Todavia, o método de empilhamento não é a única maneira de se implementar a migração Kirchhoff. De fato, Santos et al. (2000) mostraram que é possível realizar a migração baseado em um outro paradigma: o *espalhamento*. De maneira simples, pode-se entender espalhamento como o processo de *depositar o valor coletado em um ponto ao longo de uma curva*. Migração

por espalhamento, portanto, significa que as amplitudes dos traços sísmicos serão espalhados ao longo de isócronas na imagem migrada (Santos et al., 2000).

Assim, este trabalho propôs uma mudança de paradigma: *Executar a análise de velocidades em um painel de coerência (espectro de velocidade) construído por **espalhamento** ao invés de empilhamento.*

No método proposto, foram usados o modelo geológico e a expressão para tempo de trânsito convencionais, ou seja, modelo de subsuperfície estratificado horizontalmente, modelo de velocidade RMS e tempo de trânsito hiperbólico. Como medida de coerência foi escolhido o *semblance* como fórmula de partida, a fim de se entender e desenvolver um método para o seu cálculo. Uma vez que isto foi esclarecido, outras medidas de coerência também foram implementadas: Correlação cruzada (CC), quadrado das amplitudes empilhadas (E) e correlação cruzada com energia normalizada (EC). A principal diferença em relação ao método tradicional, portanto, é que os dados CMP não são mais somados ao longo de uma hipérbole para produzir o valor do *semblance* em um único ponto do painel de coerência no domínio do espectro de velocidades, mas a amplitude de cada amostra na seção CMP é espalhada ao longo de curvas apropriadas e com pesos adequados no domínio do espectro de velocidades.

### 3.1 Análise de velocidade no paradigma de espalhamento

Dois passos foram feitos para a implementação da proposta deste trabalho:

- Definição da expressão da *curva de espalhamento*;
- definição do método para o cálculo do *semblance* por espalhamento.

Cada um destes problemas é discutido a seguir.

#### 3.1.1 Famílias de hipérboles

A já conhecida fórmula do tempo de trânsito hiperbólico é

$$t^2 = t_0^2 + (x/v)^2, \quad (3.1)$$

onde  $t$  é o tempo de trânsito da reflexão;  $t_0$ , o tempo ZO;  $x$ , o afastamento; e  $v$ , a velocidade do meio ou a velocidade RMS das camadas acima do refletor. A maneira mais comum de se “ler” a fórmula acima é: para cada ponto  $(v, t_0)$  no domínio VS, existe uma hipérbole correspondente no domínio CMP. A Figura 3.1 mostra esta interpretação. Esta visão é usada no paradigma

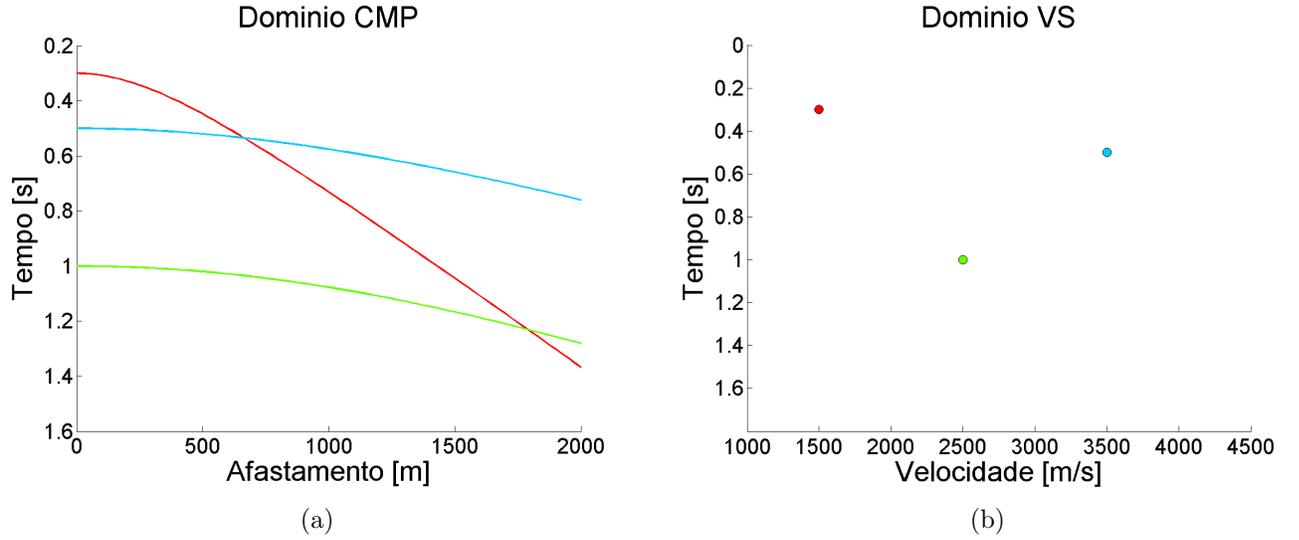


Figura 3.1: Cada ponto no domínio VS corresponde a uma curva no domínio CMP.

de empilhamento, pois o valor a ser depositado em cada ponto do domínio VS é resultado do empilhamento ao longo da curva no domínio CMP.

Porém, há outra maneira de ler a equação (3.1). Ainda segundo a fórmula, para *cada ponto*  $(x, t)$  no domínio CMP, existe uma curva correspondente no domínio VS. É nesta última leitura que se apoia a proposta deste trabalho. Com uma simples manipulação da expressão anterior, tem-se:

$$t_0^2 = t^2 - (x/v)^2, \quad (3.2)$$

na qual é exigida a condição  $v \geq |x|/t$  (Veja Figura 3.2).

Portanto, para cada ponto  $(x, t)$  no domínio CMP, é possível estabelecer uma relação de um-para-um como uma curva  $\Gamma$  no domínio VS, ou seja,

$$(x, t) \longleftrightarrow \Gamma, \quad (3.3)$$

na qual  $\Gamma$  é definida como

$$\Gamma = \left\{ (v, t_0) \mid t_0(v) = \sqrt{t^2 - (x/v)^2}, \quad v \geq |x|/t \right\}, \quad (3.4)$$

no domínio VS. Note que  $\Gamma$  também se trata de uma hipérbole, chamada de *hipérbole de empilhamento*.

Há uma outra maneira interessante de ver a mesma dualidade. É a partir deste outro modo de visualizar o problema que demonstra-se a possibilidade de construção do espectros de velocidade.

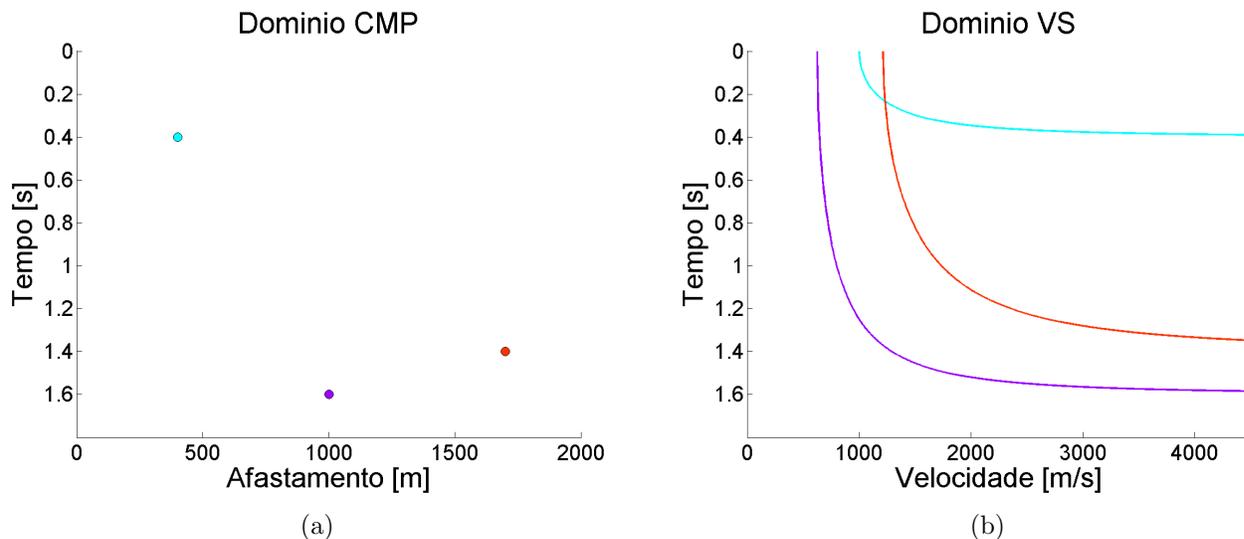


Figura 3.2: Cada ponto no domínio CMP corresponde a uma curva no domínio VS.

Pode-se mostrar que a curva de espalhamento descrita por (3.2) é um conjunto de pontos que representa uma família de curvas de tempo de trânsito, ou, assim por dizer, *hipérboles de reflexão*<sup>1</sup>, que passam por um dado ponto  $(x_i, t_i)$ . Portanto, para desenvolver a abordagem proposta, procura-se uma família de hipérboles de reflexão cuja intersecção aconteça no ponto em questão. Posto deste modo, é simplesmente requerido que os parâmetros  $t_0$  e  $v$  satisfaçam a seguinte relação:

$$t_i^2 = t_0^2 + (x_i/v)^2. \quad (3.5)$$

Isolando-se  $t_0$ , obtém-se a relação

$$t_0^2 = t_i^2 - (x_i/v)^2, \quad (3.6)$$

na qual é exigida a condição  $v \geq |x_i|/t_i$ . Inserindo-se (3.6) em (3.1), obtém-se a equação geral

$$t^2 = t_i^2 - (x_i/v)^2 + (x/v)^2 \quad (3.7)$$

que representa a família de hipérboles que se cruzam em  $(x_i, t_i)$ , e, na qual,  $v$  representa o parâmetro da família. A Figura 3.3 mostra uma família de hipérboles que se cruzam em no ponto  $(x_i, t_i)$ , na qual cada hipérbole da família mostrada na Figura 3.3a pode ser representada, na Figura 3.3b, como um ponto  $(v, t_0)$  sobre a curva de espalhamento correspondente ao ponto de intersecção no domínio CMP.

<sup>1</sup>Em contraposição ao termo hipérbole de espalhamento.

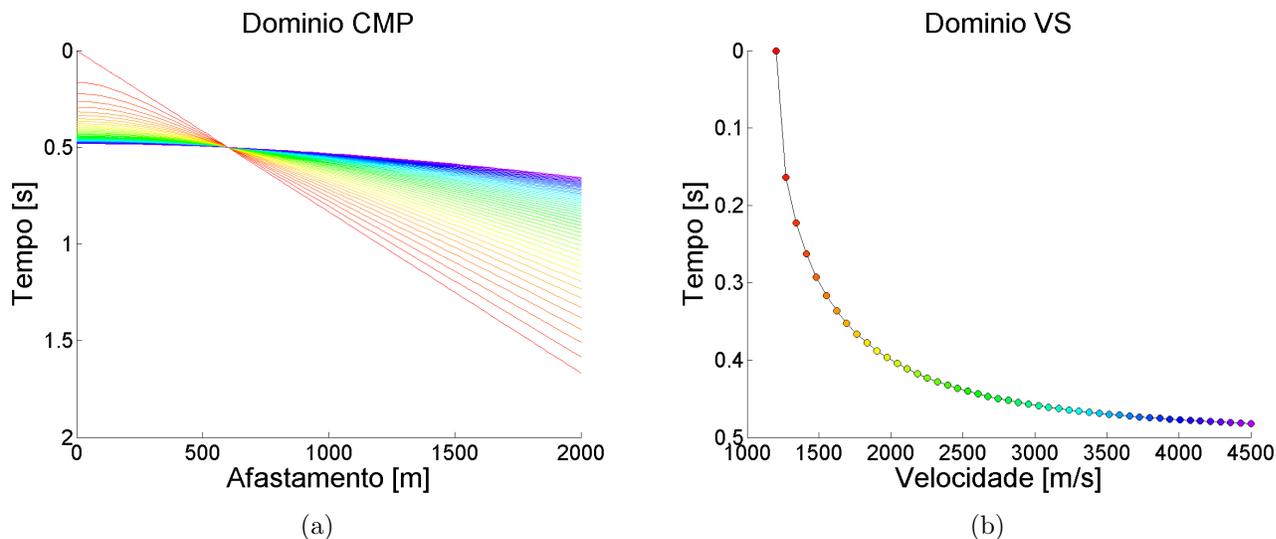


Figura 3.3: Uma família de hipérbolas, mostrada em (a), que se cruzam em um dado ponto no domínio CMP. Cada hipérbole do domínio CMP mostrada em (a) pode ser associada a um ponto no domínio VS (b), representada por um círculo da mesma cor.

De maneira análoga, é possível enxergar a hipérbole de reflexão como um conjunto de pontos que representam uma família de curvas de espalhamento que se cruzam em um dado ponto  $(v_Q, t_{0Q})$ . Esta conjunto seria descrito pela expressão:

$$t_0^2 = t_{0Q}^2 + (x/v_Q)^2 - (x/v)^2, \quad (3.8)$$

na qual  $x$  representa o parâmetro da família (veja Figura 3.4).

É justamente essa propriedade – curvas de espalhamento correspondente a pontos sobre um evento de reflexão se cruzam no ponto que fornece o tempo ZO,  $t_0$ , e a velocidade RMS,  $v$ , do evento – que será usada na construção dos espectros de velocidade.

Volte à Figura 3.4b. Após o espalhamento, qual valor será encontrado no ponto Q? A resposta a essa pergunta depende da resposta de outras duas questões: *Qual é o método de espalhamento a ser usado?*; e *Qual medida de coerência deseja-se utilizar?*

### 3.1.2 Métodos de espalhamento

Para a realização do espalhamento, foram usados dois métodos:

**Espalhamento da amplitude total** Neste método, todos os pontos do domínio VS sobre a curva de espalhamento recebem o valor da amplitude, ou do quadrado da amplitude, do ponto  $(x_i, t_i)$  no domínio CMP correspondente à curva de espalhamento.

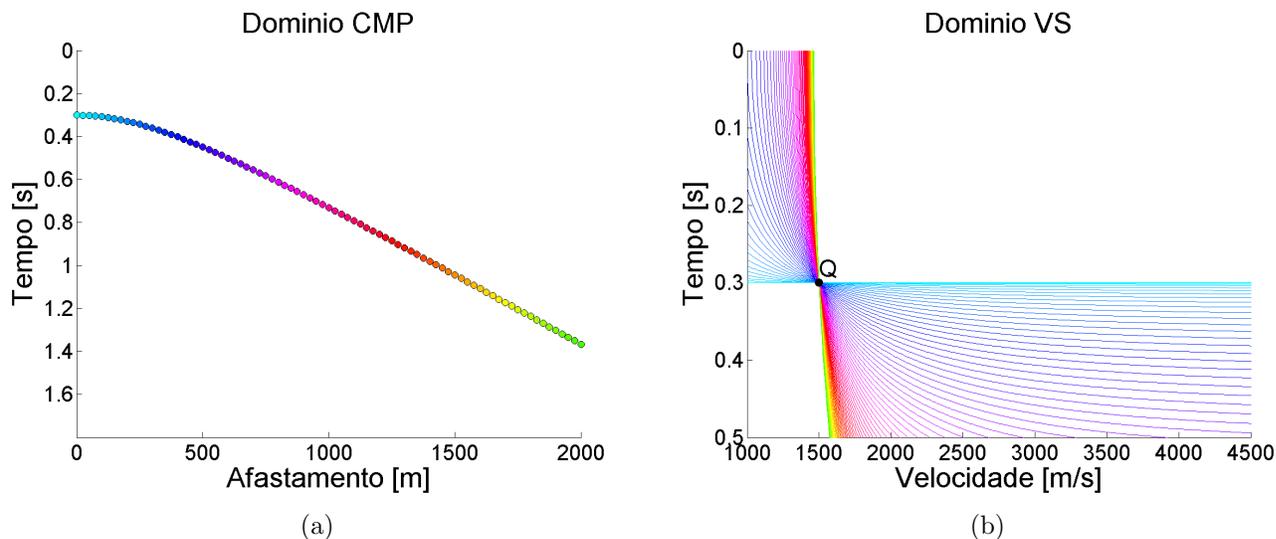


Figura 3.4: (a): Evento de reflexão hiperbólico no domínio CMP. (b): Curvas de espalhamento no domínio VS. Cada hipérbole no domínio VS é representada por um círculo no domínio CMP.

**Espalhamento por densidade constante** Neste outro, os pontos sobre a curva de espalhamento recebem valores tais que a integração (soma) ao longo do comprimento da mesma forneça o valor da amplitude, ou do quadrado da amplitude, no ponto  $(x_i, t_i)$  correspondente à curva de espalhamento, e que a densidade da amplitude ao longo da curva seja constante.

### Interpolação

Antes de descrever mais detalhadamente cada um dos métodos de espalhamento, é importante salientar que, seja qual for o método de espalhamento, este é efetuado em um domínio discretizado. Assim, o painel de coerência consiste em uma *malha* de pontos que recebem valores durante o processo. Caso a curva de espalhamento não passe exatamente sobre um ponto da malha, alguma regra de interpolação deve ser estabelecida. Assim, todo ponto que, segundo a regra de interpolação, deva receber algum valor, será considerado um “ponto sobre a curva de espalhamento”.

A Figura 3.5 ilustra o critério adotado na interpolação. Note-se que o domínio representado na figura foi intencionalmente construído com uma discretização muito “grossa” ( $\Delta t_0$  e  $\Delta v$  grandes) para permitir uma melhor visualização da regra adotada. Três casos foram individualizados:

**Curva passa sobre um ponto da malha** Neste caso, o valor foi depositado só, e somente só, no ponto em questão. Porém, este caso é raríssimo de acontecer principalmente devido a erros numéricos intrínsecos às operações com pontos flutuantes.

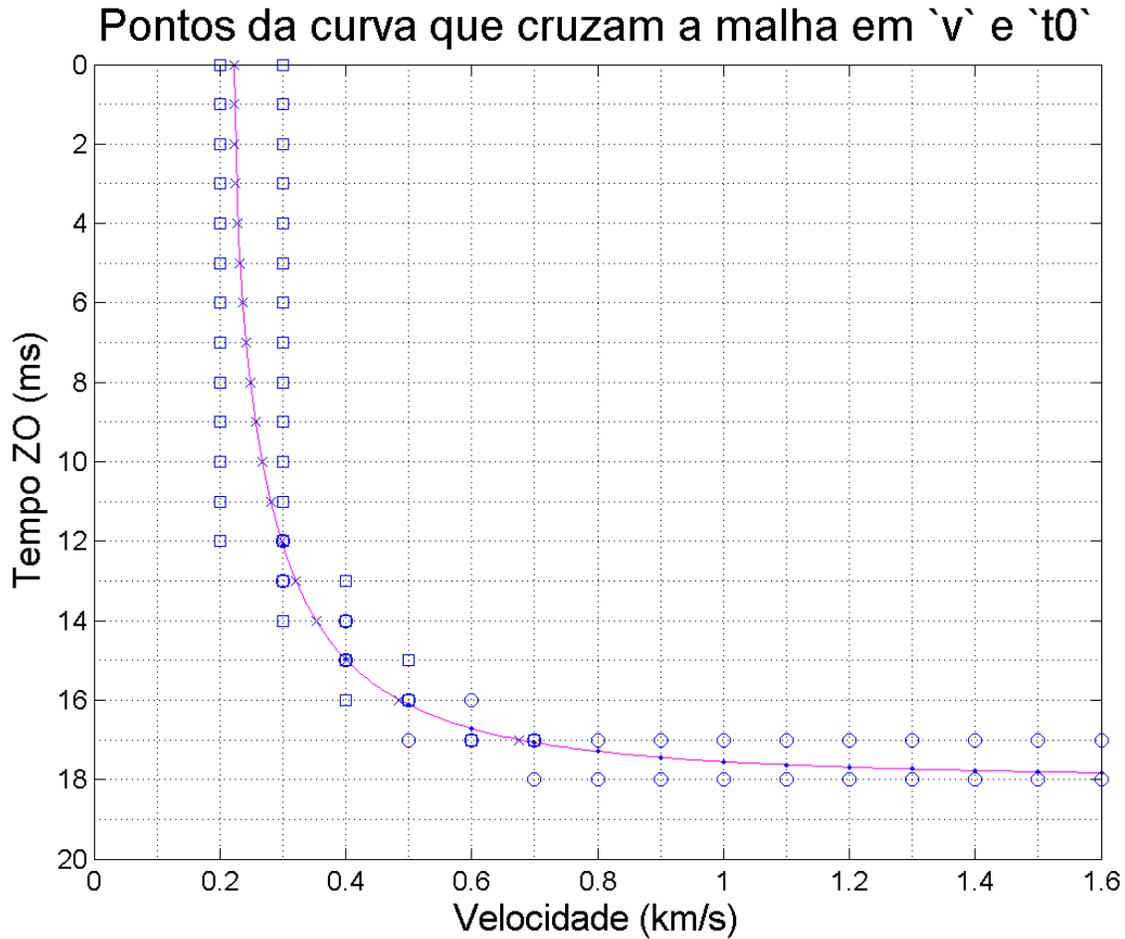


Figura 3.5: Ilustração da regra de interpolação. Pontos marcados por cruces e pequenos círculos cheios representam aqueles em que a curva de espalhamento cruza a malha. Pontos marcados por quadrados e círculos vazios representam aqueles que receberam valores durante o espalhamento.

**Curva cruza as linhas horizontais da malha** As linhas horizontais da malha representam os valores de  $t_0$  pré-determinados pelo usuário. Quando a curva de espalhamento cruza essas linhas – pontos marcados por cruces na Figura 3.5 –, os dois pontos mais próximos que possuem o mesmo  $t_0$  do ponto de cruzamento foram eleitos como aqueles a receber o valor espalhado – marcados por quadrados vazios.

**Curva cruza as linhas verticais da malha** As linhas verticais da malha representam os valores de  $v$  pré-determinados pelo usuário. Quando a curva de espalhamento cruza essas linhas – pontos marcados por pequenos círculos cheios na Figura 3.5 –, os dois pontos mais próximos que possuem o mesmo  $v$  do ponto de cruzamento foram eleitos como aqueles a receber o valor espalhado – marcados por círculos na mesma figura.

## Espalhamento da amplitude total

Nesse método foram construídos dois tipos de painéis a partir dos dados, chamados de *painéis parciais*:

**Painel A** Esse painel é o resultado do espalhamento das amplitudes  $f_i(t)$ .

**Painel A2** Painel resultante do espalhamento do quadrado das amplitudes  $f_i^2(t)$ .

Ao final do espalhamento, cada um desses painéis exibe um valor diferente. Veja a Figura 3.4b. Seja um ponto  $Q$  no domínio VS com coordenadas  $(v_Q, t_{0Q})$ . Em  $Q$  passam  $m$  hipérbolas de espalhamento. No primeiro espalhamento (Painel A), cada uma destas hipérbolas “deposita” em  $Q$  os valores  $f_i(t_i)$  correspondentes às amplitudes de cada um dos pontos sobre um possível evento de reflexão no domínio CMP. Ao final desses  $m$  espalhamentos, obtém-se, em  $Q$ , o seguinte valor:

$$A(v_Q, t_{0Q}) = \sum_{i=1}^m f_i(t_i). \quad (3.9)$$

De maneira análoga, ao se espalhar, com o mesmo procedimento, os valores  $f_i^2(t_i)$ , tem-se o painel A2, no qual, no mesmo ponto  $Q$ , obtém-se o valor:

$$A2(v_Q, t_{0Q}) = \sum_{i=1}^m f_i^2(t_i). \quad (3.10)$$

## Espalhamento por densidade constante

De modo análogo ao descrito anteriormente, dois painéis parciais foram construídos: **Painel A'** e **Painel A2'**. Porém, antes de detalhar suas construções e resultados, é necessário definir *densidade de amplitude*,  $d(x_i, t_i)$ , e *densidade de quadrado da amplitude*,  $d_2(x_i, t_i)$ .

Segundo (3.3) e (3.4), para cada ponto  $(x_i, t_i)$ , existe uma curva correspondente  $\Gamma_i$ . Como o domínio VS é delimitado pelo usuário, a curva  $\Gamma_i$  tem um comprimento  $s(x_i, t_i)$  finito dentro deste domínio chamado de *comprimento total da curva de espalhamento*. Assim, define-se

$$d(x_i, t_i) = \frac{f_i(t_i)}{s(x_i, t_i)}, \quad (3.11)$$

e

$$d_2(x_i, t_i) = \frac{f_i^2(t_i)}{s(x_i, t_i)}. \quad (3.12)$$

O valor a ser depositado durante o espalhamento será proporcional a  $d$ , no Painel A', ou a  $d_2$ , no Painel A2'. Em ambos os casos, o valor depositado em um dado ponto  $(v, t_0)$  é definido pela multiplicação da densidade pelo valor do *comprimento local da curva de espalhamento*,  $\Delta s(x_i, t_i)$ ,

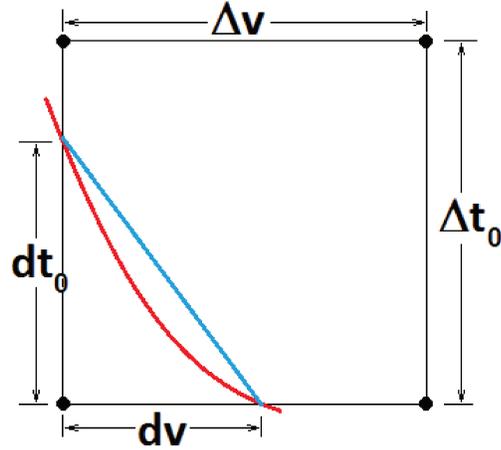


Figura 3.6: Aproximação (curva azul) para o cálculo do comprimento local  $\Delta s$  (curva vermelha).

que é definido como o comprimento da mesma dentro da célula da malha do domínio VS que contém referido ponto.

Portanto, dois tipos de comprimento de curva foram calculados: O comprimento local,  $\Delta s$ , e o comprimento total,  $s$ . No cálculo do primeiro, foi feita a aproximação indicada pelo segmento de reta azul na Figura 3.6. O comprimento  $s$  é a soma sucessiva dos  $\Delta s$  correspondentes, de modo que o valor de  $s$  também foi aproximado. Além disso, foi aplicada uma normalização para o cálculo de  $\Delta s$ , e conseqüentemente de  $s$ , mostrada na expressão abaixo:

$$(\Delta s)^2 \approx \left( \frac{dv}{\Delta v} \right)^2 + \left( \frac{dt_0}{\Delta t_0} \right)^2, \quad (3.13)$$

cujos termos são definidos na Figura 3.6.

A normalização é feita para que diferentes discretizações de  $t_0$  e  $v$  não alterem o valor a ser depositado no espalhamento por densidade constante. Assim, independente de  $\Delta t_0$  e  $\Delta v$ , a célula da malha é vista, durante o processo, como um quadrado de lado unitário e adimensional.

Dito isto, pode-se definir os dois painéis parciais construídos pelo espalhamento a densidade de amplitude constante:

**Painel A'** Esse painel é o resultado do espalhamento de valores proporcionais à densidade de amplitude  $d(x_i, t_i)$ .

**Painel A2'** Esse painel resulta espalhamento de valores proporcionais à densidade de quadrado das amplitudes,  $d_2(x_i, t_i)$ .

Resta, então, saber qual é a expressão da quantidade calculada em cada ponto  $(v, t_0)$ . Para tanto, volta-se à Figura 3.4b e ao ponto Q no domínio VS. Após o processo de construção do

primeiro painel, obtém-se

$$A'(v_Q, t_{0Q}) = \sum_{i=1}^m d(x_i, t_i) \Delta s(x_i, t_i). \quad (3.14)$$

Já o painel A2', resultado do espalhamento do quadrado da amplitude, fornece, no ponto  $Q$ , o valor

$$A2'(v_Q, t_{0Q}) = \sum_{i=1}^m d_2(x_i, t_i) \Delta s(x_i, t_i). \quad (3.15)$$

### 3.1.3 Medidas de coerência e construção do espectro de velocidades

#### *Semblance* sem janela temporal

Como dito anteriormente, usou-se o *semblance* como primeira medida de coerência. Inicialmente, foi usada uma versão simplificada da expressão mostrada em (2.18),  $S'$ , que será chamada de *semblance sem janela temporal*. A expressão “*sem janela temporal*” ou, simplesmente, “*sem janela*”, refere-se ao fato de não se executar a soma (integração) no tempo indicada em (2.18). Portanto, definiu-se  $S'$  por

$$S'(v_{NMO}, t_0) = \frac{\left[ \sum_{i=1}^m f_i(t_i) \right]^2}{m \sum_{i=1}^m f_i^2(t_i)}. \quad (3.16)$$

É fácil notar que, comparando-se (3.16), (3.9) e (3.10), pode-se escrever a equação (3.16) como

$$S'(v_{NMO}, t_0) = \frac{[A(v_{NMO}, t_0)]^2}{m A2(v_{NMO}, t_0)}. \quad (3.17)$$

Assim, é possível construir um painel de coerência utilizando-se o *semblance* sem janela por espalhamento. Para tanto, além da construção dos painéis A e A2, necessita-se construir um terceiro painel:

**Painel M** Painel que guarda o número de vezes que algum valor foi depositado em cada um dos pontos  $(v, t_0)$ .

Note-se novamente o exemplo da Figura 3.4b. Como foram feitos  $m$  espalhamentos que passam por  $Q$ , tem-se que  $M(v_Q, t_{0Q}) = m$ . Assim, de posse dos três painéis A, A2 e M, o painel

final  $S'$  é construído pela operação ponto-a-ponto dos painéis acima segundo a expressão

$$S'(v, t_0) = \frac{[A(v, t_0)]^2}{M(v, t_0) A2(v, t_0)}. \quad (3.18)$$

### *Semblance-like*

A segunda medida de coerência implementada foi chamada de *semblance-like*. Esta medida foi obtida a partir dos painéis contruídos pelo método de espalhamento por densidade constante,  $A'$  e  $A2'$ . O painel final,  $Sl$ , é obtido pela operação ponto-a-ponto dos painéis acima segundo a expressão

$$Sl(v, t_0) = \frac{[A'(v, t_0)]^2}{A2'(v, t_0)}. \quad (3.19)$$

Esta medida recebeu este nome devido a semelhança que guarda com o *semblance*. Para se enxergar esta semelhança deve-se analisar, matematicamente, o resultado da operação indicada em (3.19). Segundo (3.14), (3.15) e (3.19), tem-se

$$Sl(v_Q, t_{0Q}) = \frac{\left[ \sum_{i=1}^m d(x_i, t_i) \Delta s(x_i, t_i) \right]^2}{\sum_{i=1}^m d_2(x_i, t_i) \Delta s(x_i, t_i)} \quad (3.20)$$

Pode-se fazer algumas aproximações para melhor entender o significado da expressão. Primeiramente, considera-se o comprimento local  $\Delta s(x_i, t_i)$  constante e igual a  $\overline{\Delta s}(v, t_0)$  para todas as curvas de espalhamento, obtendo-se

$$Sl(v_Q, t_{0Q}) \approx \frac{\left[ \sum_{i=1}^m \frac{f_i(t_i)}{s(x_i, t_i)} \right]^2 \overline{\Delta s}}{\sum_{i=1}^m \frac{f_i^2(t_i)}{s(x_i, t_i)}}. \quad (3.21)$$

A Figura 3.7 mostra, no domínio CMP, o comprimento das curvas de espalhamento correspondente a cada um dos pontos  $(x, t)$ . Esse domínio CMP tem as mesmas dimensões usadas em um dos modelos de teste, descritos no Capítulo 4. A partir desta, nota-se a existência de curvas de nível que representam diferentes hipérboles de espalhamento com o mesmo comprimento. Essas curvas de nível sugerem que os comprimentos das curvas de espalhamento ao longo de uma curva de tempo de trânsito hiperbólico não variam muito, o que permite uma segunda aproximação. Ou seja, pode-se considerar  $s(x_i, t_i)$  aproximadamente constante igual a  $\bar{s}(v, t_0)$  ao longo de possíveis

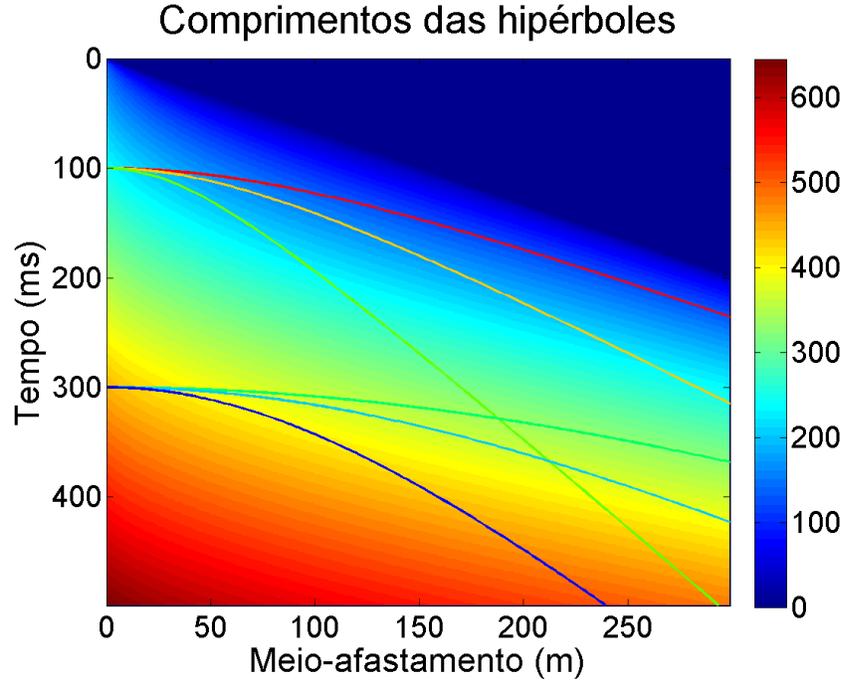


Figura 3.7: Em cada um dos pontos do domínio CMP é mostrado o comprimento da hipérbole de espalhamento correpondente. Esse domínio CMP tem as mesmas dimensões usadas em um dos modelos de teste que serão descritos no Capítulo 4.

eventos de reflexão. Para ilustrar essa aproximação, foram escolhidos seis eventos de reflexão, assinalados na Figura 3.7. Para cada um dos eventos, foi construído um gráfico que mostra o comprimento das hipérboles de espalhamento associadas a cada um dos pontos sobre a curva de reflexão (Figuras 3.8 e 3.9).

Nas Figuras 3.8 e 3.9, é possível notar que, na maioria dos casos mostrados, os valores dos comprimentos das curvas de espalhamento não variam muito (linhas grossas), se aproximando dos respectivos valores médios (linhas finas). Assim, efetuando-se a segunda aproximação propostas, a equação (3.21) assume a forma:

$$Sl(v_Q, t_{0Q}) \approx \frac{\left[ \sum_{i=1}^m f_i(t_i) \right]^2}{(\bar{s}/\Delta s) \sum_{i=1}^M [f_i(t_i)]^2}. \quad (3.22)$$

Cabe observar que, nesta aproximação, a equação anterior é muito semelhante a (3.16), com a substituição do número de amostras somadas pela razão entre os comprimentos total e local médios da curva de espalhamento. Esta semelhança justifica o nome da medida de coerência

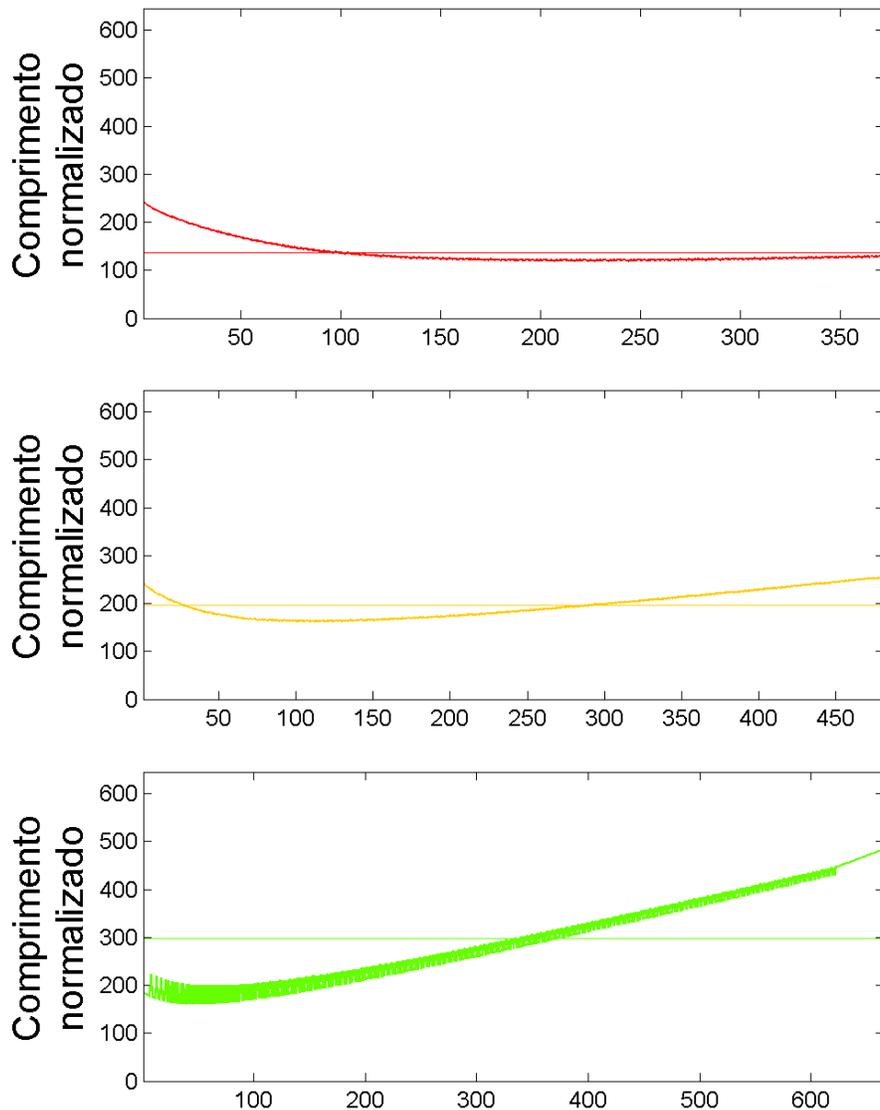


Figura 3.8: Comprimentos das curvas de espalhamento associadas aos pontos sobre possíveis eventos de reflexão. Cada gráfico exibe os comprimentos normalizados (linha grossa) correspondente ao evento de mesma cor na Figura 3.7. Nesta figura, são mostrados os três primeiros. A linha fina representa o valor médio  $\bar{s}$ . O eixo horizontal mostra o número de pontos sobre a curva.

proposta.

É importante salientar que as aproximações têm somente o escopo de permitir uma melhor interpretação do *semblance-like*, de modo que a equação implementada de fato foi a (3.20) e não a (3.22).

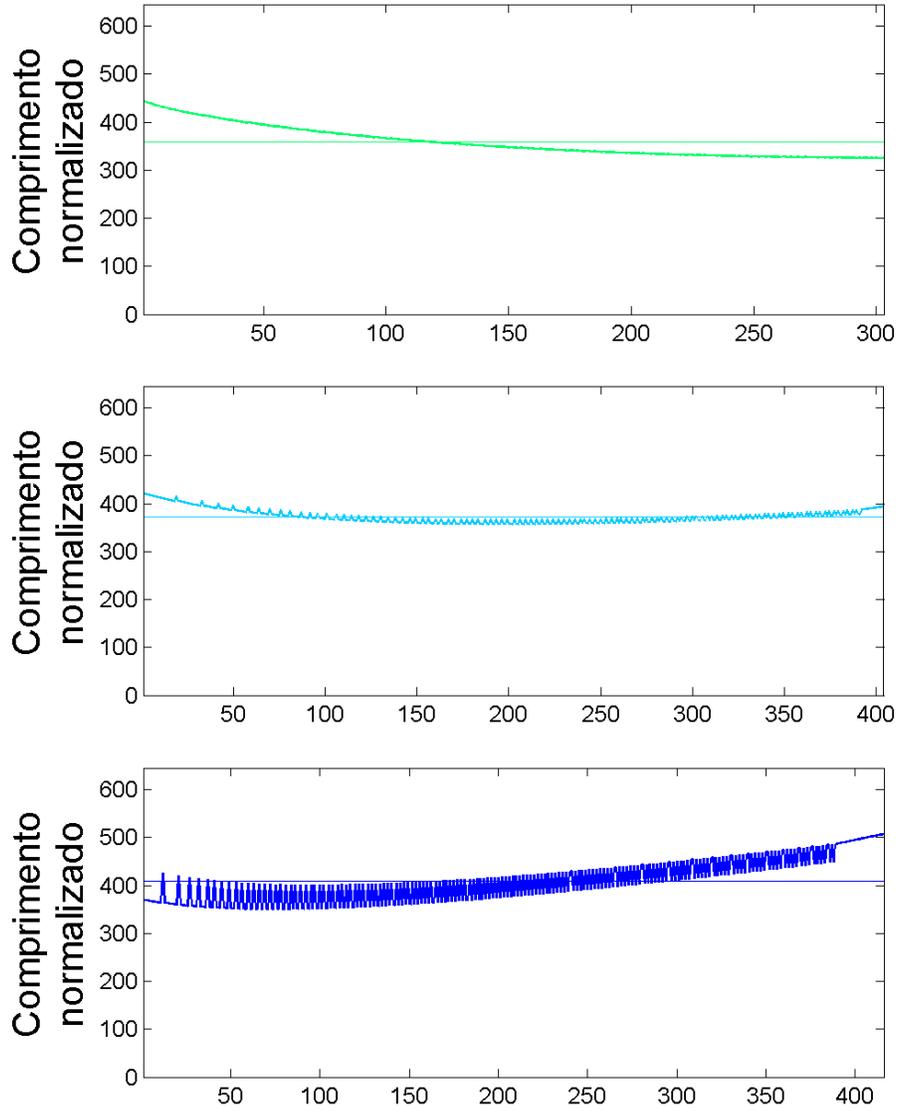


Figura 3.9: Continuação da Figura 3.8. Nesta figura são mostrados os três últimos eventos da Figura 3.7.

### Correlação cruzada não-normalizada sem janela temporal

Segundo Yilmaz (2003), (2.14) pode ser reescrita na forma

$$CC(v_{NMO}, t_0) = \sum_t \left\{ \left[ \sum_{i=1}^m f_i(t + t_i) \right]^2 - \sum_{i=1}^m f_i^2(t + t_i) \right\}. \quad (3.23)$$

De maneira análoga ao *semblance*, definiu-se a medida de coerência chamada de *correlação cruzada sem janela temporal* como:

$$CC(v_{NMO}, t_0) = \left[ \sum_{i=1}^m f_i(t_i) \right]^2 - \sum_{i=1}^m f_i^2(t_i). \quad (3.24)$$

Comparando-se (3.24) com (3.9) e (3.10), percebe-se que é possível construir um painel de coerência baseado na correlação cruzada a partir dos painéis construídos pelo método de espalhamento da amplitude total, A e A2, pela operação

$$CC(v_{NMO}, t_0) = [A(v_{NMO}, t_0)]^2 - A2(v_{NMO}, t_0). \quad (3.25)$$

### Quadrado das amplitudes empilhadas sem janela temporal

A partir da (2.17), definiu-se outra medida de coerência chamada de *Quadrado das amplitudes empilhadas sem janela temporal*:

$$E(v_{NMO}, t_0) = \left[ \sum_{i=1}^m f_i(t_i) \right]^2. \quad (3.26)$$

Comparando-se (3.24) com (3.9), percebe-se que é possível construir este espectro de velocidade a partir do painel A construído pelo método de espalhamento da amplitude total pela operação

$$E(v_{NMO}, t_0) = [A(v_{NMO}, t_0)]^2. \quad (3.27)$$

## 3.2 Outros tópicos da implementação

### 3.2.1 Região não espalhada

Ao construir os painéis de coerência, o usuário deve especificar o intervalo das velocidades NMO de tentativa. A restrição dada em (3.4),  $v \geq x_i/t_i$ , juntamente com a velocidade NMO de tentativa máxima, define, portanto, a região no domínio CMP que não terá suas amplitudes espalhadas. Veja a Figura 3.10. Os pontos dentro da região hachurada estão associados a curvas de espalhamento cuja velocidade inicial está fora do domínio definido pelo usuário. Esta restrição foi usada durante a implementação de modo a diminuir o tempo de execução do algoritmo de espalhamento.

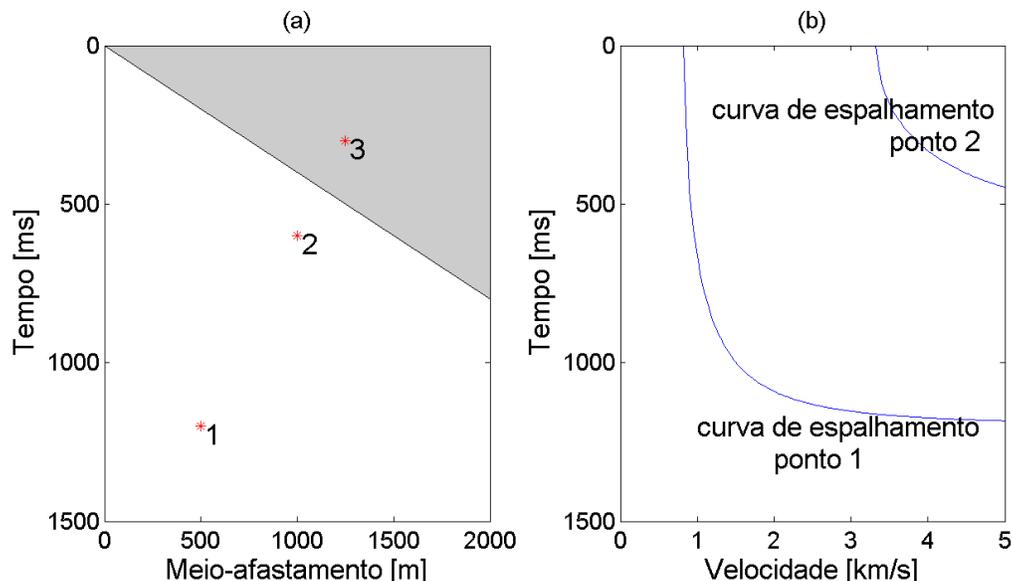


Figura 3.10: (a): Pontos no domínio CMP; o ponto 3 está na região que não terá suas amplitudes espalhadas. (b): Curvas de espalhamento no domínio VS.

### 3.2.2 Abertura mínima

No caso de refletores mais profundos e maiores velocidades RMS envolvidas no experimento sísmico, as seções CMP devem apresentar uma abertura mínima do afastamento de modo a evidenciar o ponto de intersecção no domínio VS (Yilmaz, 2003). A Figura 3.11 mostra a razão. Se a abertura não é grande o bastante, o ponto de intersecção no painel *A* produzido pela somatória das amplitudes espalhadas não fica bem definido. Pela mesma razão, pontos onde não deveria haver valores altos em comparação ao ponto de intersecção devido a somas de valores não coerentes acabam ficando em evidência. Para evitar esse efeito, a relação que se segue deve se satisfeita:

$$x_{min} \sim v_m t_m, \quad (3.28)$$

na qual  $v_m$  e  $t_m$  são, respectivamente, a máxima velocidade RMS e máximo tempo ZO esperados.

Essa restrição é obtida observando que, para uma boa individualização do ponto de intersecção como visto na Figura 3.11b, deve haver hipérbolas de espalhamento cuja velocidade mínima seja próxima à velocidade RMS associada ao evento de reflexão correspondente. Assim a partir da restrição dada em (3.4), chega-se à (3.28).

Esta imposição não é um problema restrito ao método de espalhamento. Conforme Yilmaz (2003), a falta de informação dada por afastamentos largos leva a falta de valores de sobretempo normal significativos o que dificulta a discriminação da velocidade. Ou seja, este é um problema

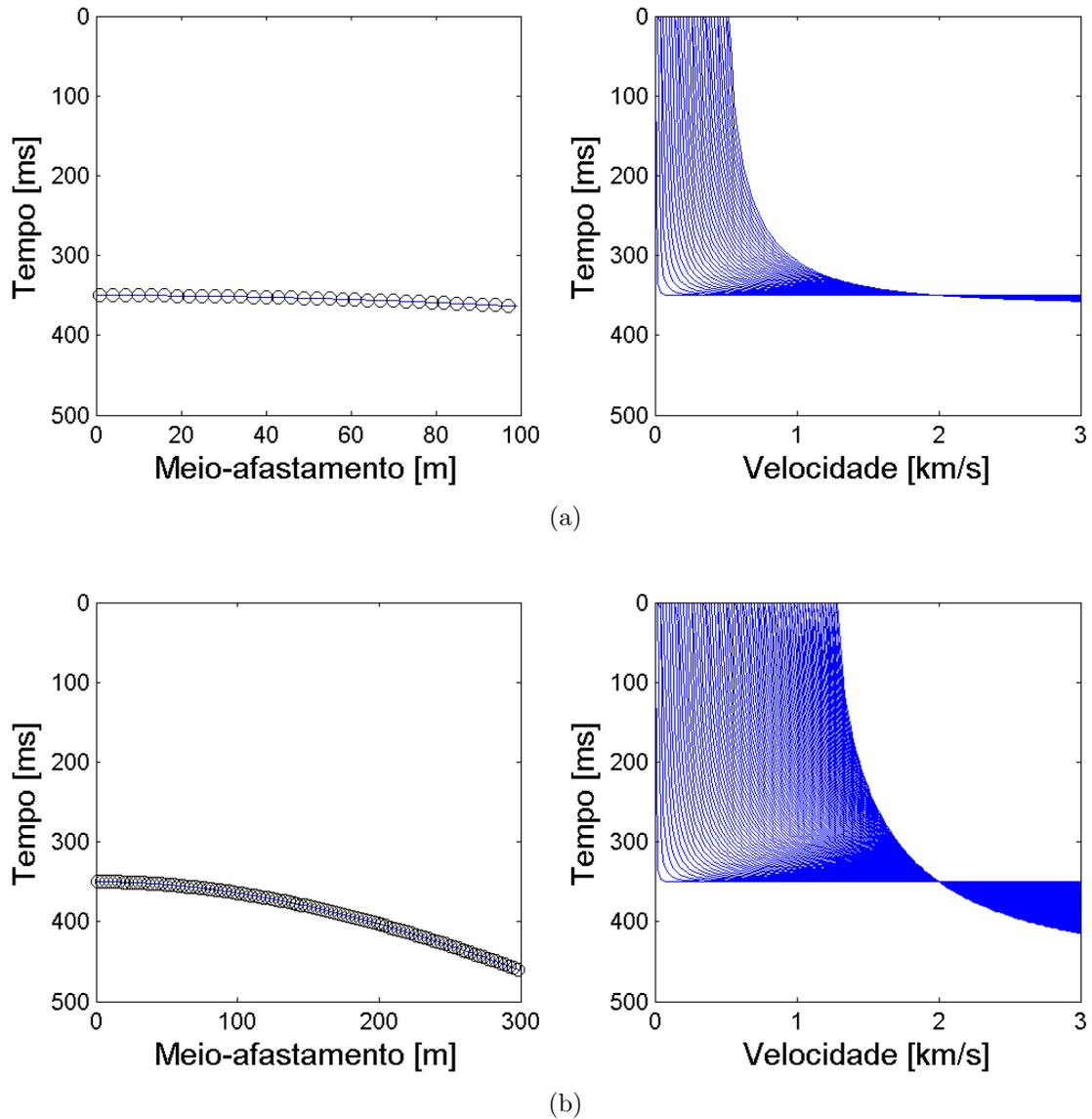


Figura 3.11: (a): Hipérbole de um evento de reflexão no domínio CMP e curvas de espalhamento correspondentes no domínio VS. (b): Mesmo evento, com abertura mais larga. Cada hipérbole no domínio da direita é representada por um círculo no domínio da esquerda.

intrínseco à análise de velocidade baseada no sobretempo normal e não da metodologia proposta. Assim, seja o paradigma proposto, seja o convencional, ambos sofrem com a mesma contradição: a aproximação de segunda ordem do sobretempo normal – tempo de trânsito hiperbólico – é tanto melhor quanto menor for a abertura máxima, porém, a discriminação da velocidade pelo sobretempo normal é tanto melhor quanto maior a abertura for.

### 3.2.3 Janela temporal

As formulações completas de duas das medidas de coerência implementadas – *semblance* e correlação cruzada – envolvem somas (integração) sobre janelas temporais, como mostrado em (2.18) e (2.14).

Para explicar a implementação da janela temporal, toma-se o caso do *semblance* como exemplo. Para as outras medidas, a implementação é feita de maneira análoga.

Veja a expressão abaixo, que corresponde à (2.17) ou ao numerador da (2.18).

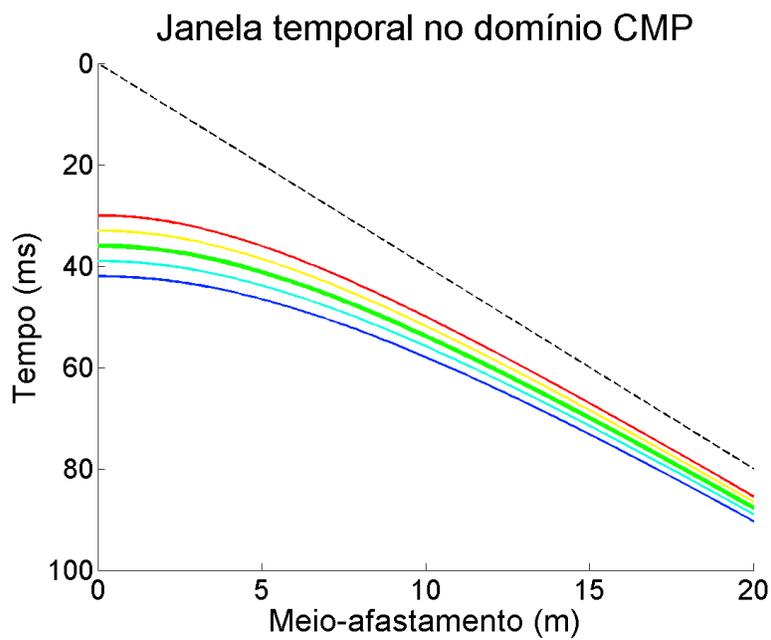
$$E(v_{NMO}, t_0) = \sum_t \left[ \sum_{i=1}^m f_i(t + t_i) \right]^2. \quad (3.29)$$

Do ponto de vista do empilhamento, a somatória interna corresponde a empilhar os valores sobre uma curva de reflexão. Na Figura 3.12a corresponderia, por exemplo, a somar os valores sobre o evento de cor verde e linha mais grossa. A somatória externa, que corresponde à janela temporal significa que, ao invés de empilhar somente os dados sobre o evento “central”, deve-se somar também os valores em torno deste até o limite definido pela janela.

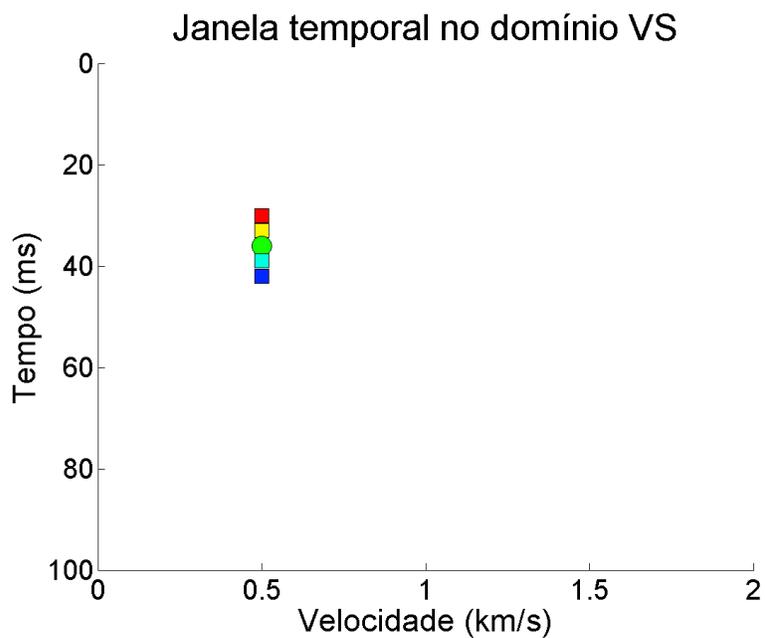
Na Seção 3.1.2 foi visto que, pelo método de espalhamento da amplitude total, o painel A tem como resultado final o valor acumulado da somatória interna de (3.29). Assim, no exemplo da Figura 3.12, o ponto verde no domínio VS acumula a soma das amplitudes do evento verde; o ponto vermelho, as amplitudes do evento vermelho, e assim por diante. Portanto, no domínio VS, elevar ao quadrado os valores e depois somar os pontos correspondentes aos eventos de reflexão de ambos os lados do evento central equivale a somar dentro da janela temporal delimitada pelos eventos mais externos no domínio CMP.

Para as medidas de coerência *semblance* e correlação cruzada, foram implementados algoritmos com e sem janela.

No Apêndice B são indicadas quais funções foram implementadas, seus dados de entrada e de saída e apresentados os esquemas dos algoritmos implementados para cada uma das funções.



(a)



(b)

Figura 3.12: (a): Eventos de reflexão no domínio CMP. Todos os eventos mostrados correspondem a curvas com a mesma velocidade, porém, com tempos ZO diferentes (b): Pontos no domínio VS correspondentes aos eventos assinalados no domínio CMP.

---

## 4 Modelos e resultados

---

As duas metodologias de espalhamento e as diferentes medidas de coerências implementadas foram testadas em dois modelos diferentes. O primeiro modelo, mais simples foi usado para testar a implementação. Já para os outros dois modelos foram feitos testes com diferentes níveis de ruído para testar a robustez da proposta em relação a esta questão.

Todos os dados sintéticos foram gerados no MATLAB. A construção dos eventos usou, para o Modelo 1, a expressão do tempo de trânsito hiperbólico, e, para os outros dois modelos, o *método da composição gráfica*, técnica desenvolvida em Portugal (2009). Este método calcula o tempo de trânsito exato em modelos horizontalmente estratificados. Isso permite comparar o quanto a aproximação hiperbólica influencia o resultado da análise de velocidade, especialmente em casos em que a abertura máxima é maior. Não foi considerado a influência do espalhamento geométrico, nem dos coeficientes de reflexão na amplitude do dados sintéticos.

De maneira geral será apresentado o esquema do modelo; os dados gerados, com e sem ruído; os painéis gerados por cada método de espalhamento; e, por fim, os espectros de velocidades para cada uma das medidas de coerência implementadas.

### 4.1 Modelo 1

A Figura 4.1 mostra o Modelo 1. A abertura máxima do meio-afastamento foi de  $300\text{ m}$ , com espaçamento da malha,  $\Delta h$ , de  $1\text{ m}$ . Já o tempo de registro foi de  $500\text{ ms}$  com taxa de amostragem,  $\Delta t$ , de  $1\text{ ms}$ . O ruído aleatório adicionado foi tal que  $SNR = 2$ .<sup>1</sup>

A Figura 4.2 mostra os dados sintéticos sem ruído, enquanto na Figura 4.3 é possível ver os mesmos dados com o ruído adicionado.

Na Figura 4.4 são mostrados os painéis A e A2 construídos pelo método de espalhamento da amplitude total. Na Figura 4.5 são mostrados os painéis A' e A2' do método de espalhamento por densidade de amplitude. Na Figura 4.6 são mostrados o Painel M, do espalhamento da amplitude total e o painel C, com os comprimentos das hipérboles de espalhamento utilizados no método de espalhamento por densidade constante.

---

<sup>1</sup> $SNR$ , do inglês “*signal-noise ratio*”, significa *razão sinal-ruído*. Neste trabalho a razão sinal-ruído é definida como a razão entre o valor máximo dos dados sem ruído e o valor máximo do ruído aleatório adicionado.

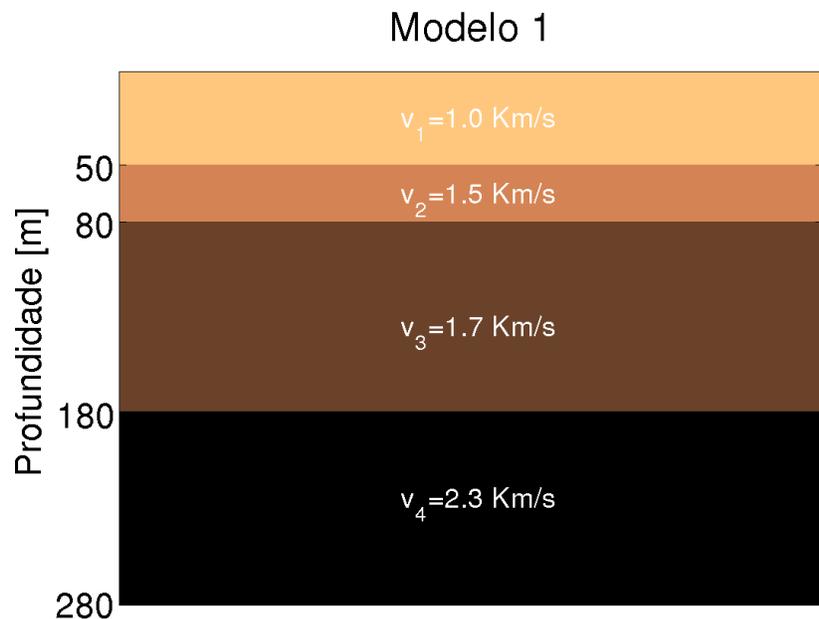


Figura 4.1: Modelo 1. Na figura estão mostradas as velocidades sísmicas e espessuras de cada camada.

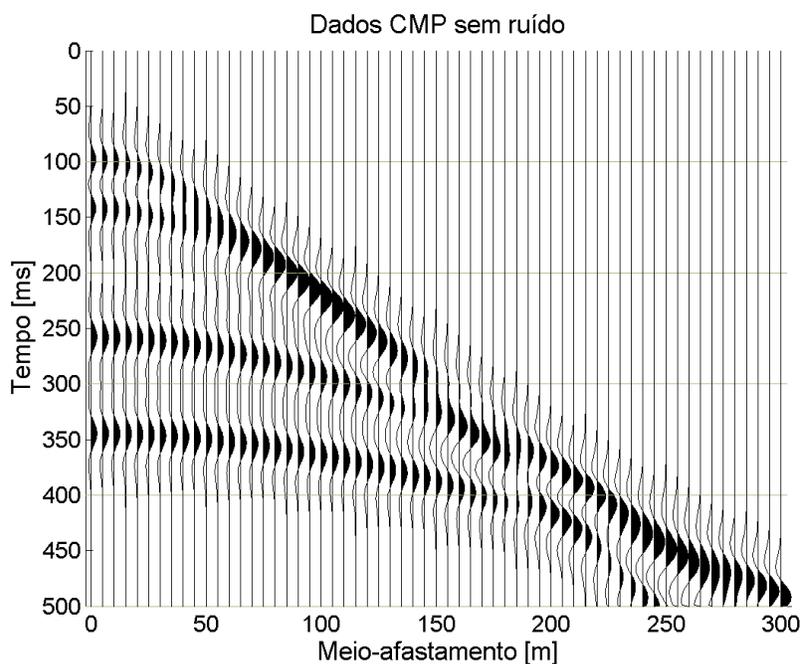


Figura 4.2: Dados sintéticos sem ruído usados na análise de velocidade por espalhamento do Modelo1.

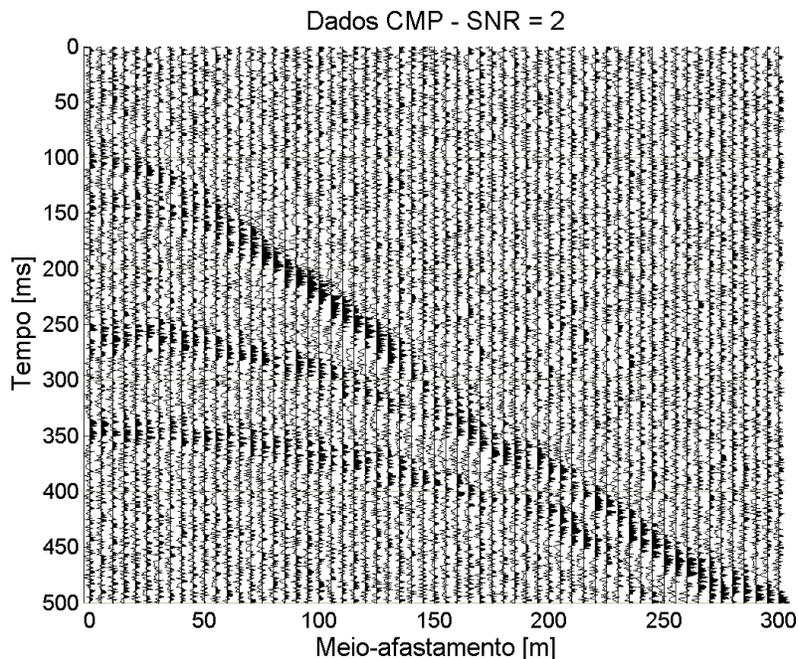


Figura 4.3: Dados sintéticos gerados a partir do modelo 1 com ruído tal que  $SNR = 2$ .

A Figura 4.7 traz o espectro de velocidades com *semblance* calculado por espalhamento. A Figura 4.8 mostra o espectro de velocidades com o *semblance-like* calculado por espalhamento. Por fim a Figura 4.9 mostra o espectro de velocidade com *semblance* calculado por empilhamento, o que permite comparar os métodos propostos com o convencional. Os círculos marcados nas figuras mostram as velocidades RMS e os tempos ZO teóricos calculados a partir das características do Modelo 1.

A análise das Figuras 4.7, 4.8 e 4.9 traz algumas questões interessantes. O canto inferior esquerdo da Figura 4.7 e o canto esquerdo (mas, principalmente, o canto inferior esquerdo) da Figura 4.9 apresentam valores falsamente altos de coerência. Apesar da diferença entre os métodos de cálculo de coerência e de interpolação, a razão desses falsos valores é a mesma: pequenos valores de  $m$ , ou seja, poucos “depósitos” quando é feito o espalhamento (veja Figura 4.6a), ou poucos pontos somados quando é feito o empilhamento. Isto não acontece no caso da Figura 4.8 pois o *semblance-like* não depende desse parâmetro. Na Figura 4.10 e 4.11 são retiradas manualmente as regiões em questão e feita uma normalização para permitir comparação entre os métodos. Mesmo procedimento é feito para os próximos modelos. Estes painéis modificados serão chamados, de agora em diante, *painéis “com cortes”*.

Em segundo lugar, pode-se ver que o *semblance-like* pode fornecer valores maiores que 1. Isso também exige uma normalização (veja Figura 4.12).

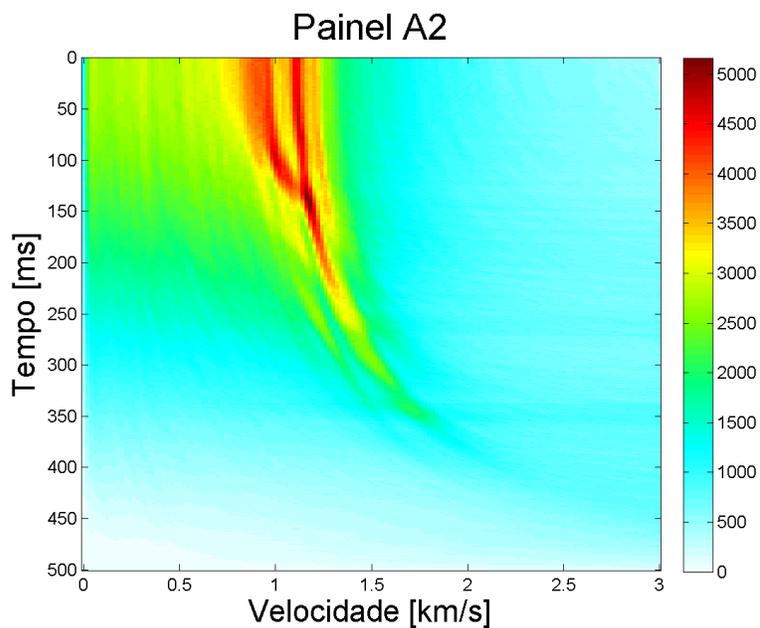
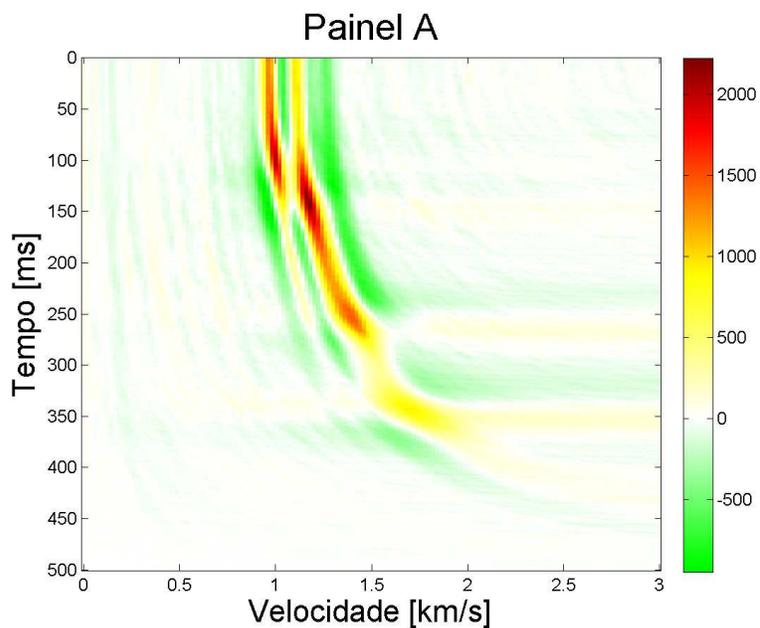
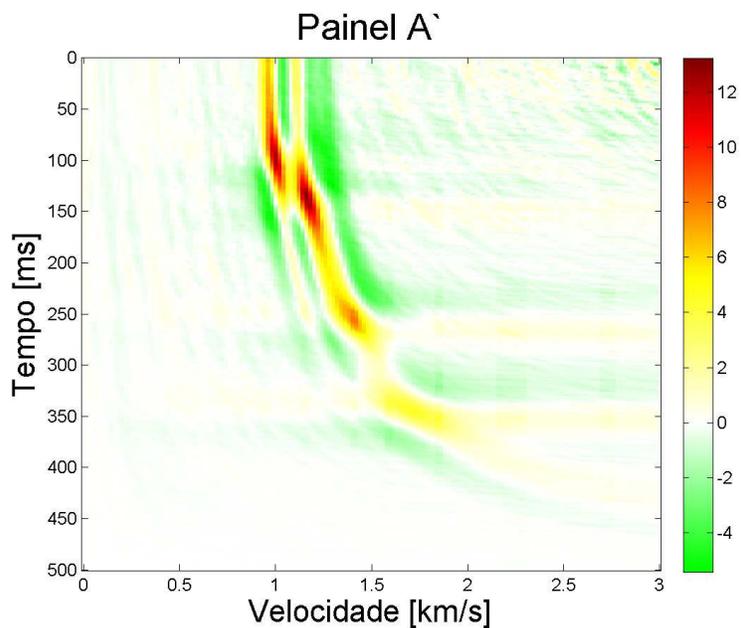
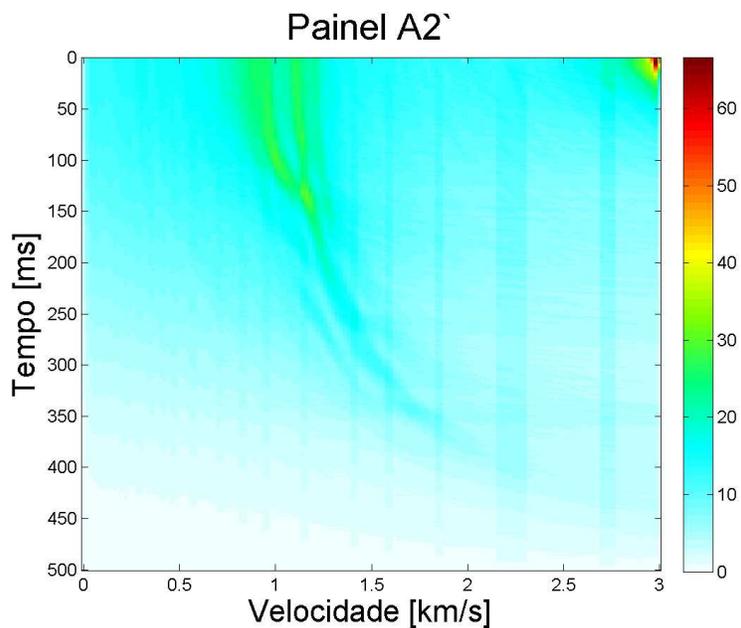


Figura 4.4: (a): Painel A. (b): Painel A2.

Outra questão que merece atenção é o fato de que os eventos mais rasos sejam mais evidentes quando usado o *semblance-like*. Isto pode ser explicado pela Figura 3.7. Veja que, segundo a aproximação que foi feita durante o estudo do *semblance-like*, mostrada na equação (3.22), quanto menor o comprimento total da curva de espalhamento, maior o valor da medida de coerência.



(a)



(b)

Figura 4.5: (a): Painel A'. (b): Painel A2'.

Os eventos mais rasos estão associados a curvas de espalhamento menores, fornecendo, portanto, valores maiores do *semblance-like*.

Por fim, vê-se, no canto superior direito da Figura 4.5b valores anormalmente altos. Isto é devido a densidade de amplitude falsamente alta, devido ao pequeno comprimento das curvas

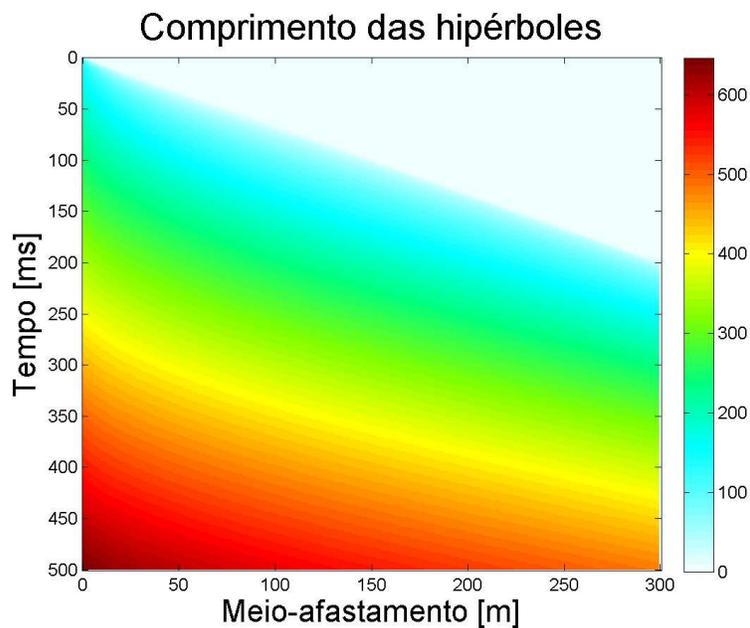
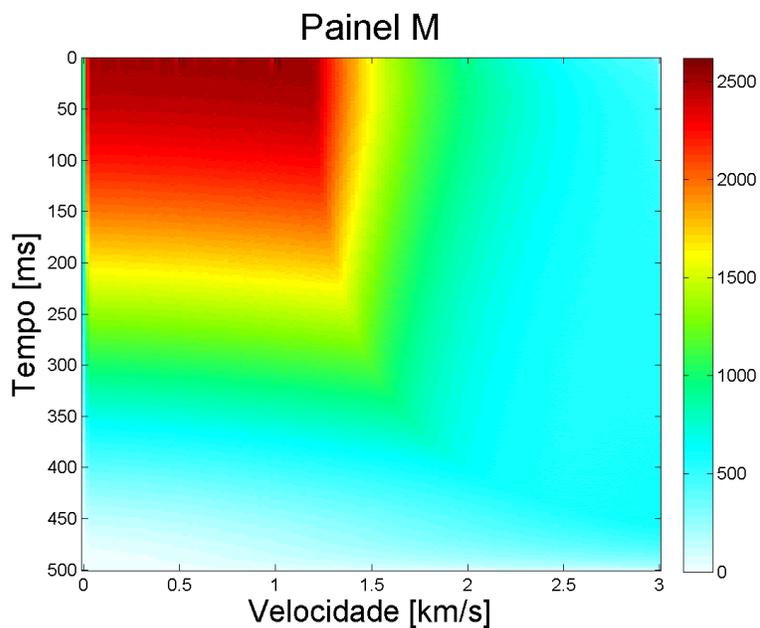


Figura 4.6: (a): Painel M. (b): Painel C.

de espalhamento associadas àquela região. Isto, aparentemente não influenciou o resultado do espectro de velocidades, mas sugere que é possível, em outras condições (alto ruído, por exemplo), que valores de coerências anormais estejam associados a essa região.

O fato do *semblance-like* e do *semblance* por espalhamento apresentarem problemas intrínsecos

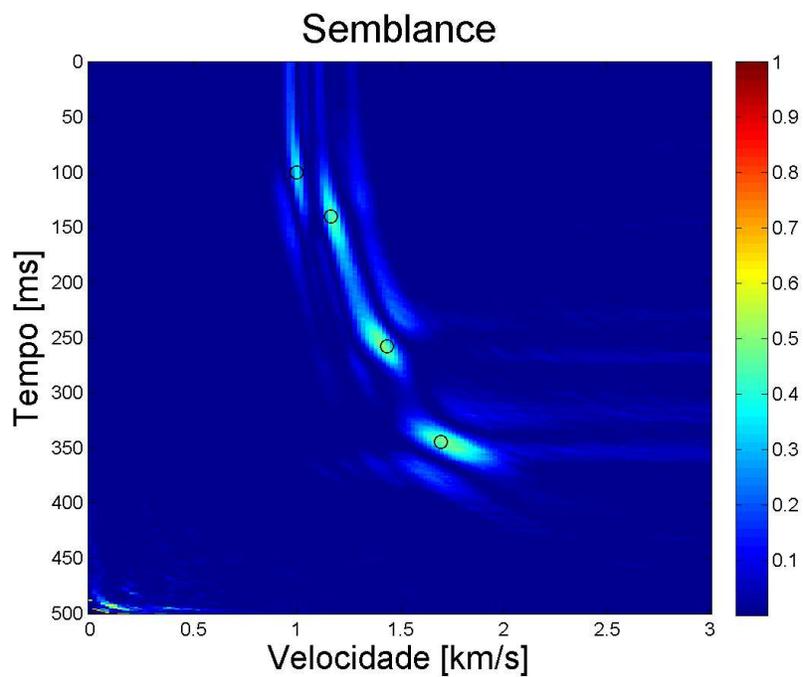


Figura 4.7: Espectro de velocidades do Modelo 1 com *semblance* por espalhamento. Os círculos marcam as velocidades RMS e os tempos ZO teóricos.

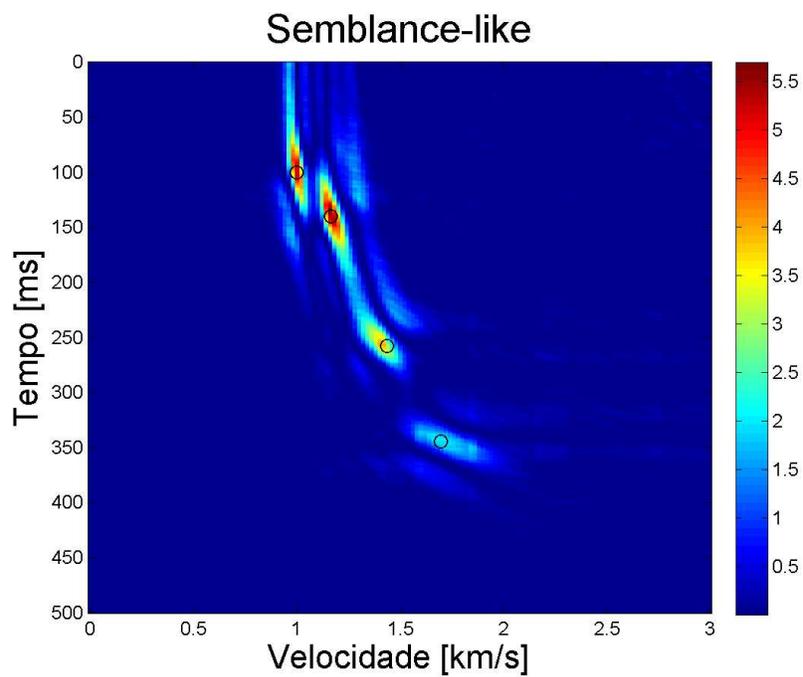


Figura 4.8: Espectro de velocidades do Modelo 1 com *semblance-like* por espalhamento.

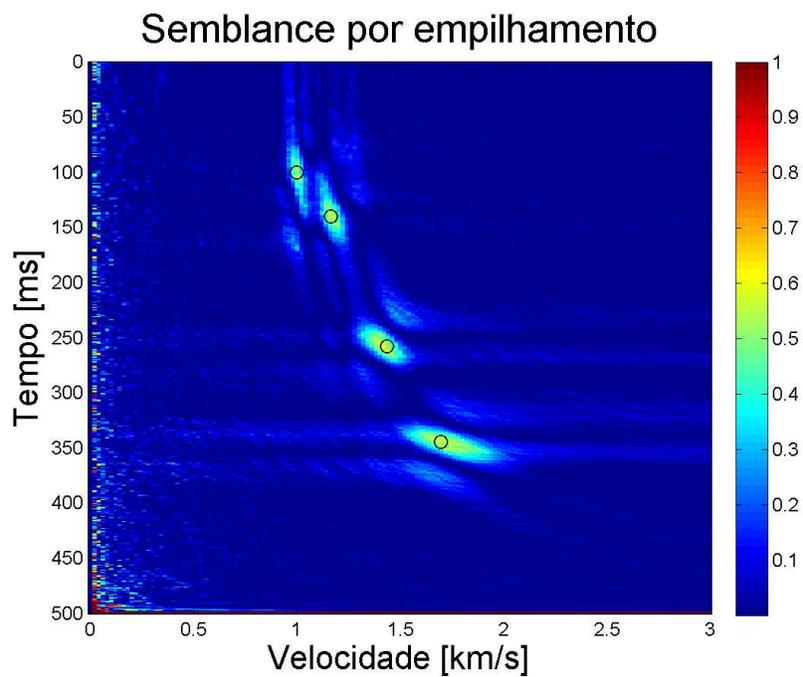


Figura 4.9: Espectro de velocidades do Modelo 1 com semblance por empilhamento.

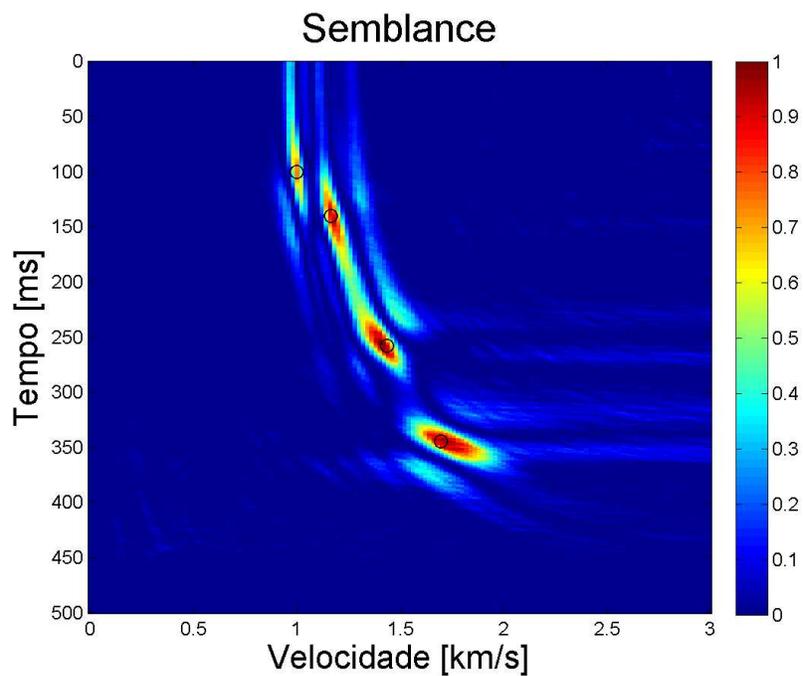


Figura 4.10: Espectro de velocidades do Modelo 1 com *semblance* por espalhamento. Partes com falsos valores foram retiradas e painel normalizado.

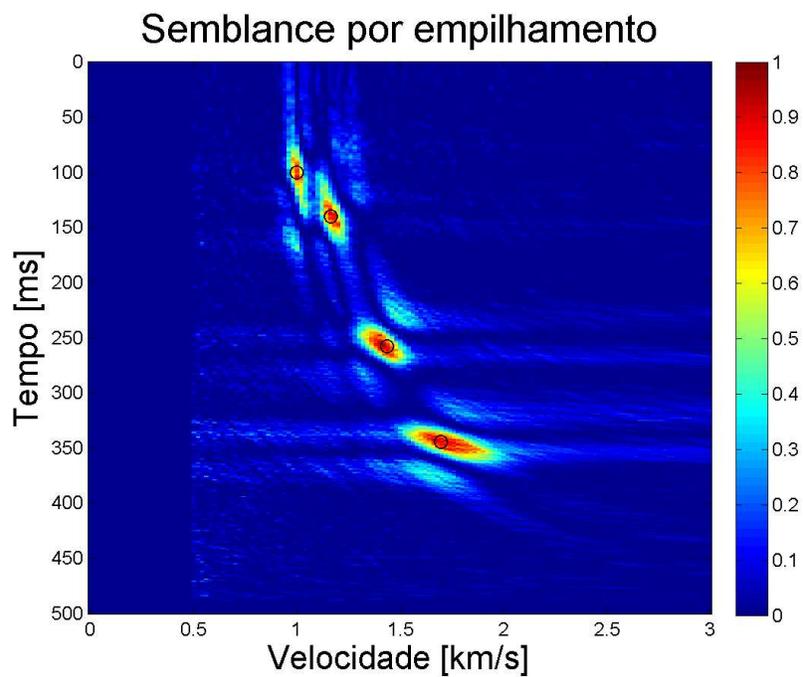


Figura 4.11: Espectro de velocidades do Modelo 1 com semblance por empilhamento. Partes com falsos valores foram retiradas e painel normalizado.

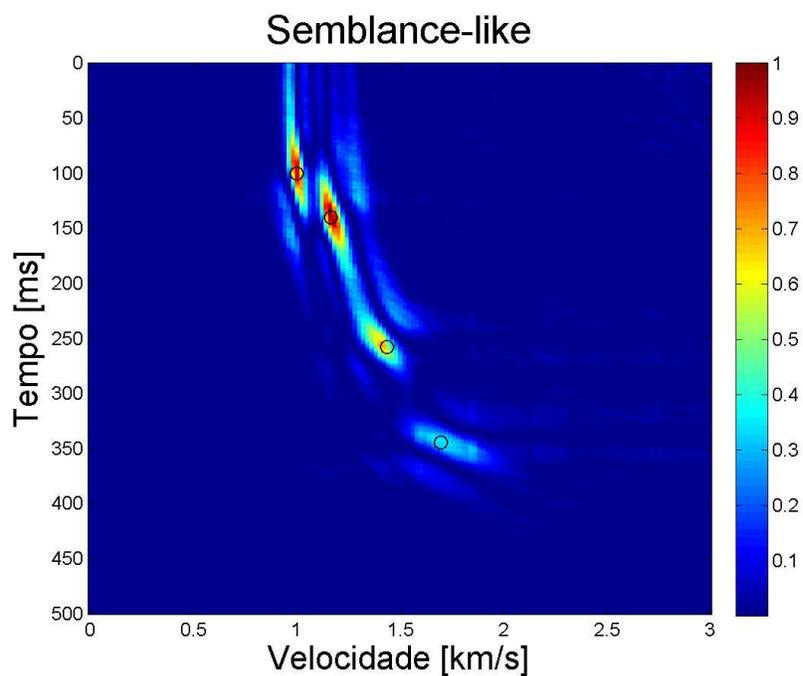


Figura 4.12: Espectro de velocidades do Modelo 1 com *semblance-like* por espalhamento. Painel normalizado.

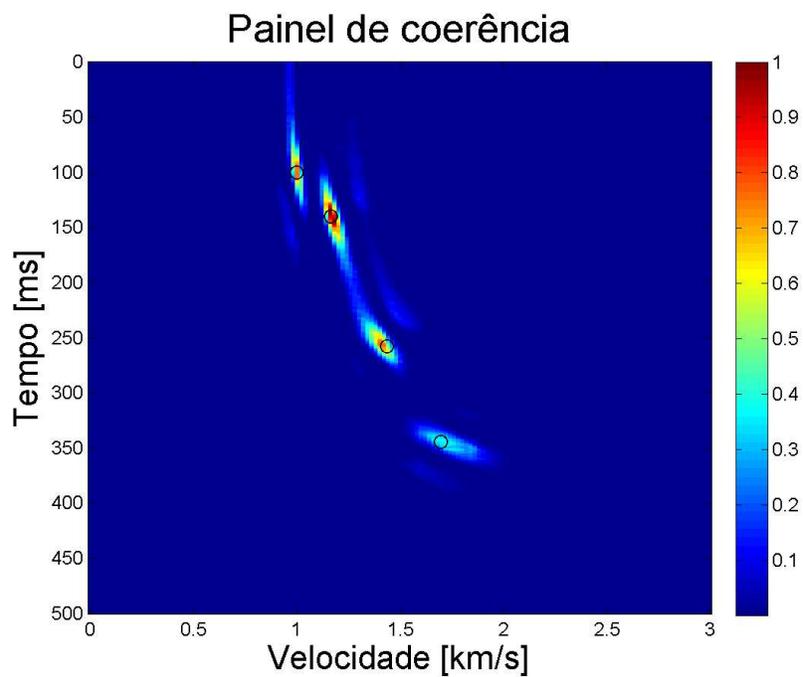


Figura 4.13: Painel normalizado resultante da multiplicação de  $S'$  e  $Sl$ .

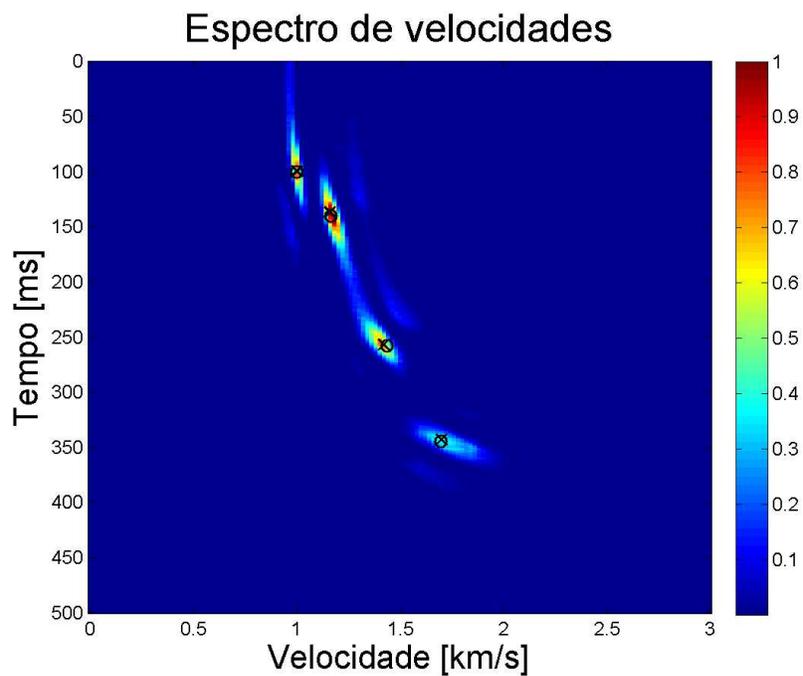


Figura 4.14: Painel normalizado resultante da multiplicação de  $S'$  e  $Sl$ . Os valores dos picos de coerência estão marcados por um 'X'; valores teóricos para  $t_0$  e  $v_{RMS}$ , por um círculo.

	$v$ (km/s)	$v'$ (km/s)	erro(%)	$Z$ (m)	$Z'$ (m)	erro(%)
camada 1	1,0000	1,0000	0	50,000	50,000	0
camada 2	1,5000	1,5099	0,6568	80,000	77,932	2,5847
camada 3	1,7000	1,6680	1,8822	180,000	178,012	1,1042
camada 4	2,3000	2,3453	1,9715	280,000	278,862	0,4064

Tabela 4.1: Valores das velocidades sísmicas das camadas do Modelo 1 ( $v$ ), velocidades sísmicas calculadas a partir dos picos de coerência ( $v'$ ), erro relativo entre elas; profundidades dos refletores do Modelo 1 ( $Z$ ), profundidades calculadas a partir dos picos de coerência ( $Z'$ ), e erro relativo entre elas.

à sua implementação em posições diferentes (altos valores falsos no canto superior direito e no canto inferior esquerdo, respectivamente) sugere uma multiplicação ponto a ponto entre os painéis  $S'$ , do *semblance* por espalhamento, e  $SI$ , do *semblance-like*, fazendo com que os pontos de coerência verdadeira se reforcem, e os de falsa, se anulem. O resultado normalizado pode ser visto na Figura 4.13.

Por fim é interessante poder avaliar o erro entre o valor das velocidades sísmicas das camadas e profundidades dos refletores do modelo e os valores destes obtidos a partir do espectro de velocidade. Para fazer esta avaliação foi usado o espectro de velocidade resultante da multiplicação dos espectros obtidos pelo *semblance* e *semblance-like*. Como o Modelo 1 foi gerado usando-se a aproximação hiperbólica, esperava-se uma concordância muito boa entre os valores obtidos e teóricos, o que foi observado (veja Figura 4.14 e Tabela 4.1). As pequenas variações observadas podem ser explicadas pelos erros numéricos intrínsecos às operações com ponto flutuante e aqueles introduzidos pela discretização do domínio VS, além, é claro, daquele advindo da existência de ruído.

## 4.2 Modelo 2

A Figura 4.15 mostra o Modelo 2. A abertura máxima do meio-afastamento foi 1500 m, com espaçamento da malha,  $\Delta h$ , de 20 m. Já o tempo de registro é de 3s com taxa de amostragem,  $\Delta t$ , de 4 ms. Diferentes níveis de ruído aleatório foram adicionados.

A Figura 4.16a mostra os dados sintéticos sem ruído para o Modelo 2, enquanto nas Figuras 4.16b e 4.17 é possível ver os mesmos dados com diferentes níveis de ruído ( $SNR$  igual a 20, 1 e 0.5, respectivamente).

No Apêndice C, reservado para alguns resultados que não serão mostrados no corpo da dis-



Figura 4.15: Modelo 1. Na figura estão mostradas as velocidades sísmicas e espessuras de cada camada.

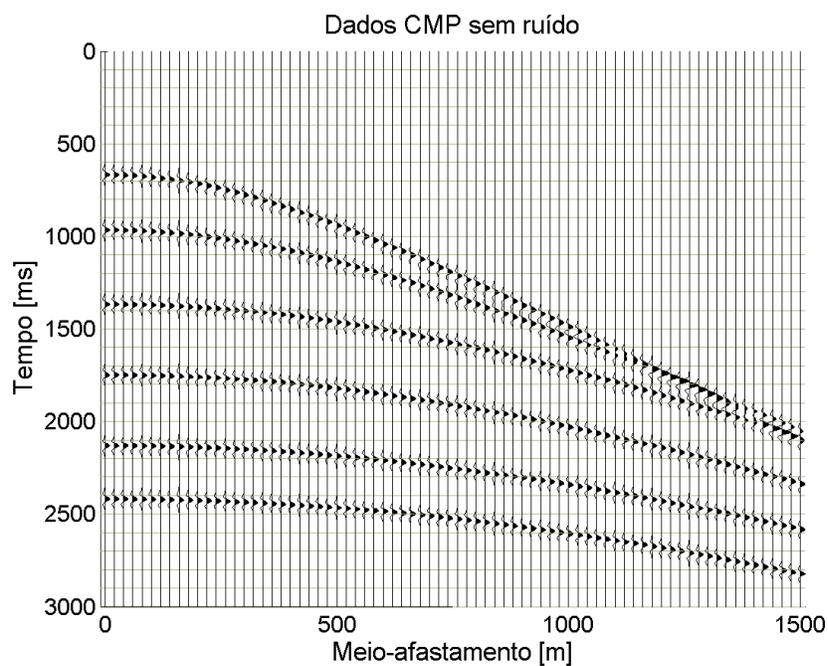
sertação, pode-se encontrar os painéis A, A2, A' e A2' produzidos a partir dos dados do Modelo 2 com diferentes níveis de ruído. Além disso são mostrados os painéis: M, do espalhamento da amplitude total; e C, com os comprimentos das hipérbolas de espalhamento utilizados no método de espalhamento por densidade constante correspondentes ao Modelo 2.

Neste modelo, além do *semblance* por espalhamento,  $S'$ , e *semblance-like*,  $Sl$ , também foram usadas outras medidas de coerência: *semblance* com janela temporal,  $S$ ; correlação cruzada não-normalizada<sup>2</sup>,  $CC$ , e quadrado das amplitudes empilhadas,  $E$ . Além disso, foi feito o *semblance* por empilhamento,  $SE$ , para permitir a comparação.

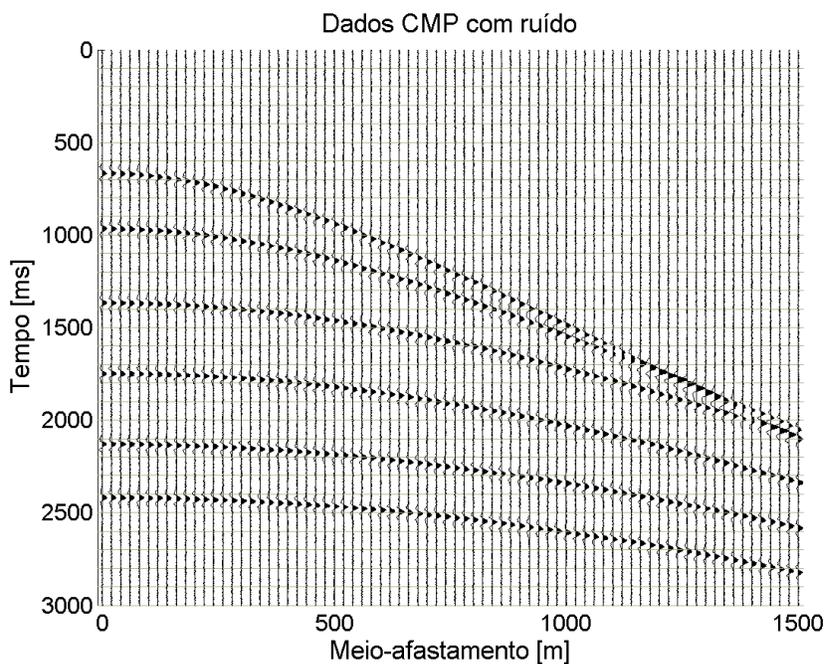
Nas Figuras 4.18a e 4.18b podem ser vistos, respectivamente, os espectros de velocidade da correlação cruzada e quadrado das amplitudes para o Modelo 2 com  $SNR = 1$ . Os demais espectros, para o mesmo modelo, mas com níveis de ruído diferentes, podem ser vistos no Apêndice C.

Dois comentários podem ser feitos. O primeiro diz respeito à pouca diferença existente entre essa duas medidas. Pelas equações (3.25) e (3.27), vê-se que estas medidas são iguais a menos de uma subtração dos quadrados da amplitude empilhados. Comparando-se as Figuras 4.18b e 4.19, é possível notar que o quadrado das amplitudes empilhadas ( $A^2$ ) é, em geral, pelo menos, uma

<sup>2</sup>Toda vez que uma medida de coerência for nomeada, assume-se que a referência é feita àquela sem janela temporal. O caso contrário deve ser explicitado.



(a)



(b)

Figura 4.16: (a):Dados sintéticos sem ruído usado na análise de velocidade por espalhamento do Modelo 2. (b): Dados sintéticos produzidos a partir do Modelo 2 com  $SNR = 20$ .

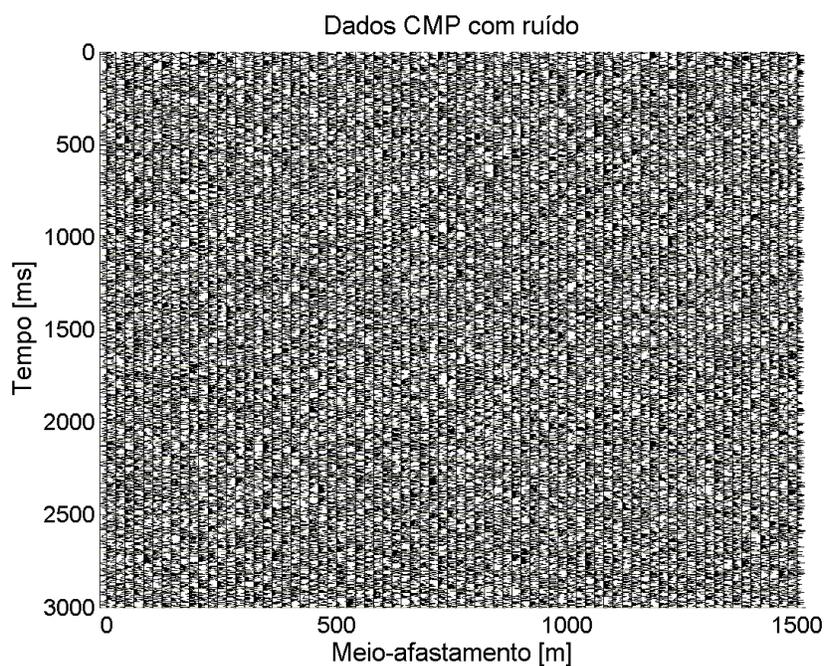
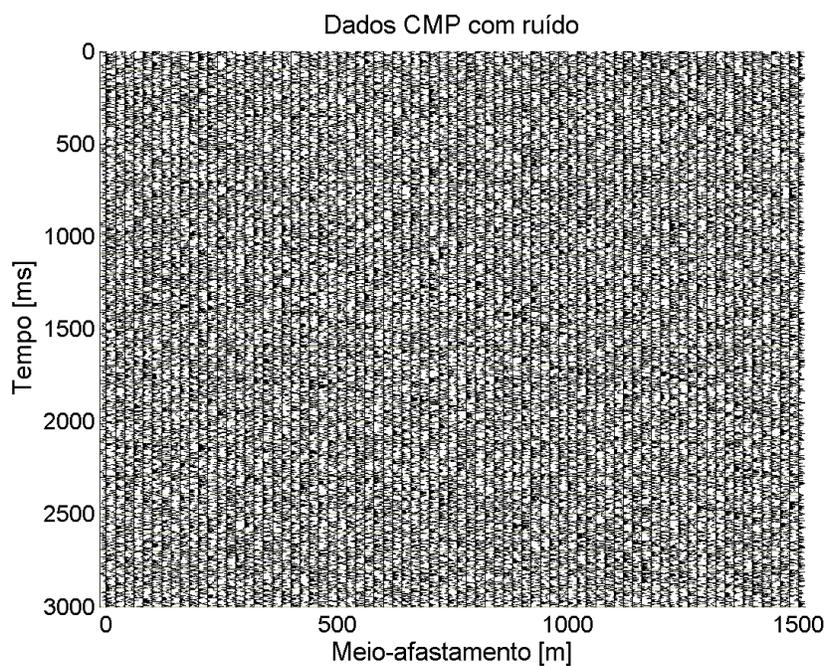


Figura 4.17: Dados sintéticos do Modelo 2. (a):  $SNR = 1$ . (b):  $SNR = 0.5$ . Os dados com  $SNR = 20$  podem ser visto no Apêndice C (Figura 4.16b).

ordem de grandeza maior que os quadrados da amplitude empilhados (A2).

O segundo diz respeito a pouca eficiência destas medidas quando a relação sinal-ruído é significativa, o que leva ao aparecimento de falsos positivos maiores que os pontos de coerência esperados (ver Figura 4.20). Porém, o ponto a ser ressaltado é o fato que é possível calcular outras medidas de coerência com o método de espalhamento.

Os espectros de velocidade baseados no *semblance* sem janela dos dados com razões sinal-ruído de 1 e 0.5 podem ser vistos na Figura 4.21. Como já eram esperados, os valores falsamente altos do canto inferior esquerdo já foram retirados previamente (painel “com cortes”). Para os painéis “sem cortes”, recorrer ao Apêndice C. Note-se que, para  $SNR = 1$ , todos os eventos são bem discriminados. Contudo, quando  $SNR = 0.5$ , somente os eventos mais profundos são, com alguma dificuldade, discriminados. Porém, ambos os painéis estão muito “sujos”.

Uma maneira de diminuir essa “sujeira” nos espectros de velocidade é aplicar a janela temporal. Os resultados do *semblance* com janela temporal podem ser vistos a seguir (Figura 4.22). Neles foram usados uma janela de 20 *ms*. Além disso, foram feitos “cortes” nos painéis para permitir comparação com a Figura 4.24. No Apêndice C, são mostrados os mesmos painéis, porém, sem “cortes” e outros painéis construídos com janelas temporais diferentes (12 *ms* e 28 *ms*, ambos sem “cortes”). Percebe-se uma suavização nos espectros de velocidades, contudo há um reforço dos artefatos na direção da janela temporal (vertical). O efeito da janela temporal talvez seja mais evidente na versão “sem cortes”, especialmente no que diz respeito ao falsos valores do canto inferior esquerdo dos painéis construídos com *semblance*.

Os espectros de velocidade com *semblance-like* do modelo 2, são vistos na Figura 4.23 para razões sinal-ruído de 1 e 0.5. Ambos apresentam valores falsamente altos no canto superior direito, com já era esperado. Novamente, para  $SNR = 1$ , os eventos são bem individualizados, o que não acontece quando  $SNR = 0.5$ .

Finalmente, são mostrados os espectros construídos com *semblance* por empilhamento para permitir a comparação com todos os outros espectros mostrados. Como foi costume, têm-se os espectros “com cortes” para as razões sinal-ruído de 1 e 0.5 no corpo do texto (Figura 4.24), enquanto as versões “sem cortes” e o resultado para  $SNR = 20$  estão no Apêndice C.

De um modo geral, viu-se que, quando a razão sinal-ruído é de 1, é possível individualizar os eventos mas existe muita “sujeira” em todos os espectros de velocidade mesmo quando aplicado a janela temporal. Já para  $SNR = 0.5$ , alguns eventos nem mesmo são discriminados. Contudo, a qualidade do espectro de velocidade, especialmente no caso da razão sinal-ruído igual a 1, pode ser melhorada executando-se mesma operação feita no Modelo 1 e mostrada na Figura 4.13: a multiplicação de painéis. Foram feitos dois casos, para cada dos níveis de ruído: multiplicação de

	$v_{RMS}$ (km/s)	$v_m$ (km/s)	erro(%)	$t_0$ (ms)	$t_{0m}$ (ms)	erro(%)
camada 1	1,5000	1,5000	0	666,667	672,000	0,8000
camada 2	1,6713	1,6600	0,6736	966,667	972,000	0,5517
camada 3	1,9506	1,8900	3,1072	1366,667	1368,000	0,0976
camada 4	1,9841	1,9200	3,2323	1747,619	1748,000	0,0218
camada 5	2,1086	2,0400	3,2517	2132,234	2132,000	0,0110
camada 6	2,1076	2,0400	3,2053	2417,949	2416,000	0,0806

Tabela 4.2: Valores das velocidades RMS teóricas das camadas do Modelo 2 ( $v_{RMS}$ ), velocidades RMS obtidas a partir dos picos de coerência ( $v_m$ ), erro relativo entre elas; Tempos ZO teóricos do Modelo 2 ( $t_0$ ), Tempos ZO obtidos a partir dos picos de coerência ( $t_{0m}$ ), e erro relativo entre eles.

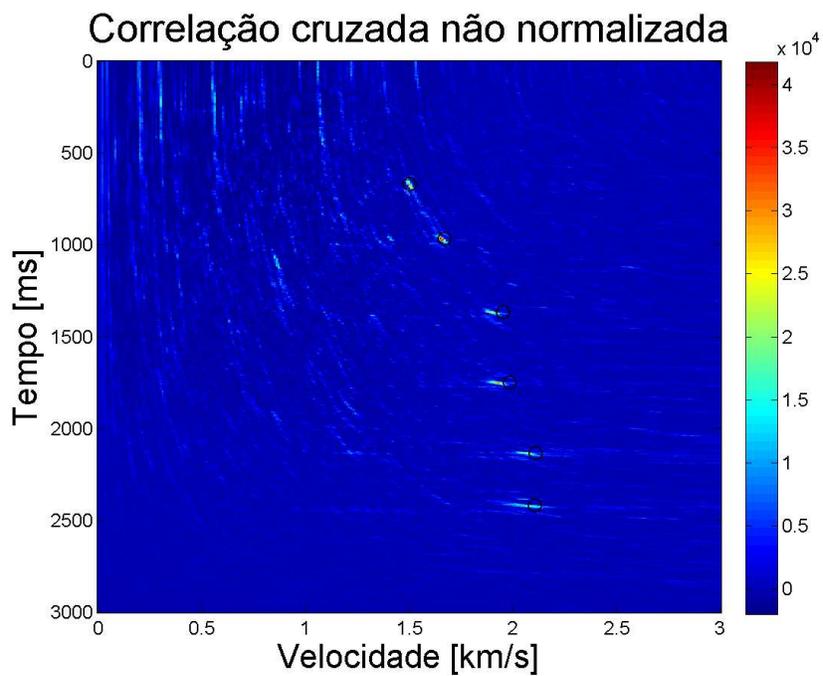
	$v$ (km/s)	$v'$ (km/s)	erro(%)	$Z$ (m)	$Z'$ (m)	erro(%)
camada 1	1,5000	1,5000	0	500,000	504,000	0,8000
camada 2	2,0000	1,9718	1,4081	800,000	799,776	0,0280
camada 3	2,5000	2,3614	5,5438	1300,000	1267,334	2,5128
camada 4	2,1000	2,0243	3,6037	1700,000	1651,955	2,8262
camada 5	2,6000	2,5149	3,2729	2200,000	2134,817	2,9629
camada 6	2,1000	2,0400	2,8571	2500,000	2424,497	3,0201

Tabela 4.3: Valores das velocidades sísmicas das camadas do Modelo 2 ( $v$ ), velocidades sísmicas calculadas a partir dos picos de coerência ( $v'$ ), erro relativo entre elas; profundidades dos refletores do Modelo 2 ( $Z$ ), profundidades calculadas a partir dos picos de coerência ( $Z'$ ), e erro relativo entre elas.

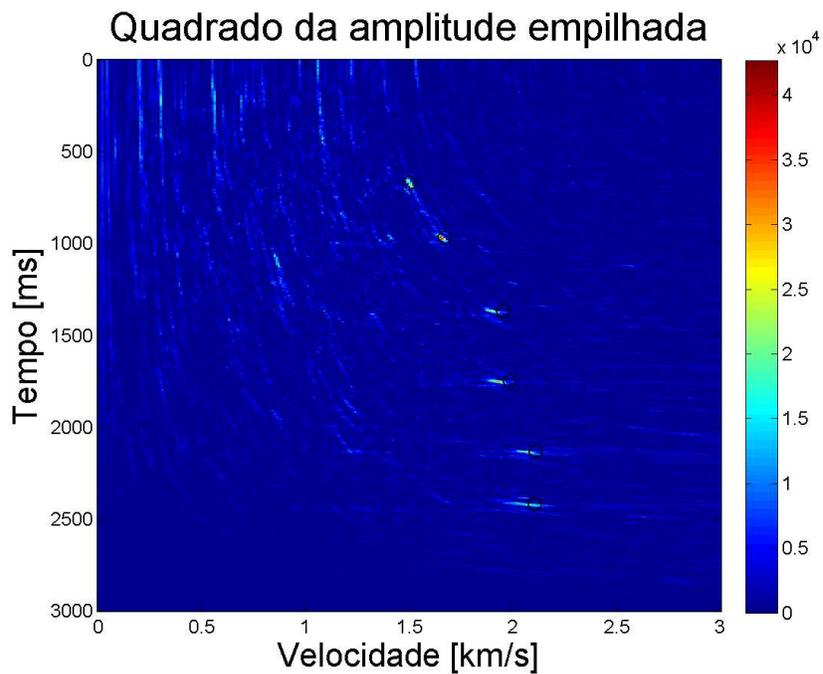
S' por Sl (Figura 4.25); e de S por Sl (Figura 4.26). No último caso, S por Sl, para  $SNR = 1$  foi usada uma janela temporal de  $20\text{ ms}$ ; para  $SNR = 0.5$ , de  $28\text{ ms}$ . Do mesmo modo que antes, este procedimento melhora consideravelmente a qualidade dos espectros.

Como no modelo anterior, foi feita a comparação entre os valores das velocidades sísmicas das camadas e as profundidades dos refletores do modelo e aquelas obtidas pelo espectro. O espectro de velocidades utilizado para tal comparação foi aquele resultante da multiplicação dos espectros obtidos pelo *semblance* com janela de  $20\text{ ms}$  e *semblance-like* para  $SNR = 1$ . Na Figura 4.27, pode-se ver que a concordância entre os picos de coerência e os valores teóricos não é a mesma obtida no modelo anterior. Isto já era esperado pois os dados sintéticos foram gerados pelo *método da composição gráfica*, que calcula o tempo de trânsito exato em modelos

horizontalmente estratificados. Porém, é interessante notar que o erro relativo entre os valores teóricos e obtidos para os tempos ZO são significativamente menores do que os erros relativos entre as velocidades RMS teóricas e calculadas, e que as velocidades RMS obtidas são sempre menores que as velocidades teóricas (veja Tabela 4.2). Isto mostra que o modelo hiperbólico se ajusta bem ao tempo de trânsito da reflexão para pequenas aberturas mas, ao fazer isso, produz tempos hiperbólicos com velocidades menores que a do modelo sintético (veja Figura 4.28). O fato de se obter bons resultados para os tempos ZO poderia levar a crer que os valores de profundidades dos refletores também apresentariam menores discrepâncias com o modelo. Porém, como as velocidades sísmicas também são necessárias para o cálculo das profundidades, o erro daquelas acaba por influenciar o erro das últimas (veja Tabela 4.3).



(a)



(b)

Figura 4.18: (a): Correlação cruzada não-normalizada. (b): Quadrado das amplitudes empilhadas. Ambos painéis foram construídos por espalhamento a partir do Modelo 2 com  $SNR = 1$ .

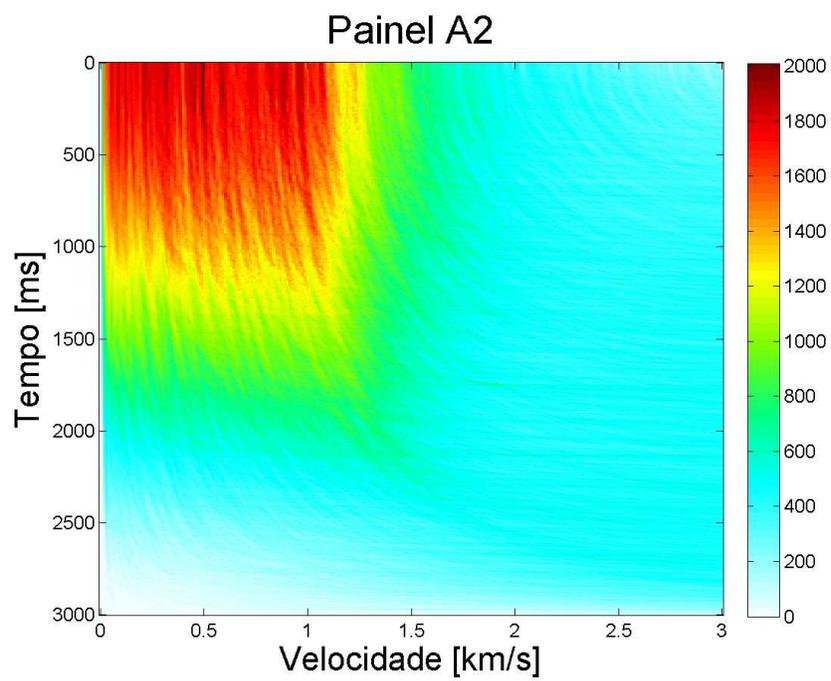
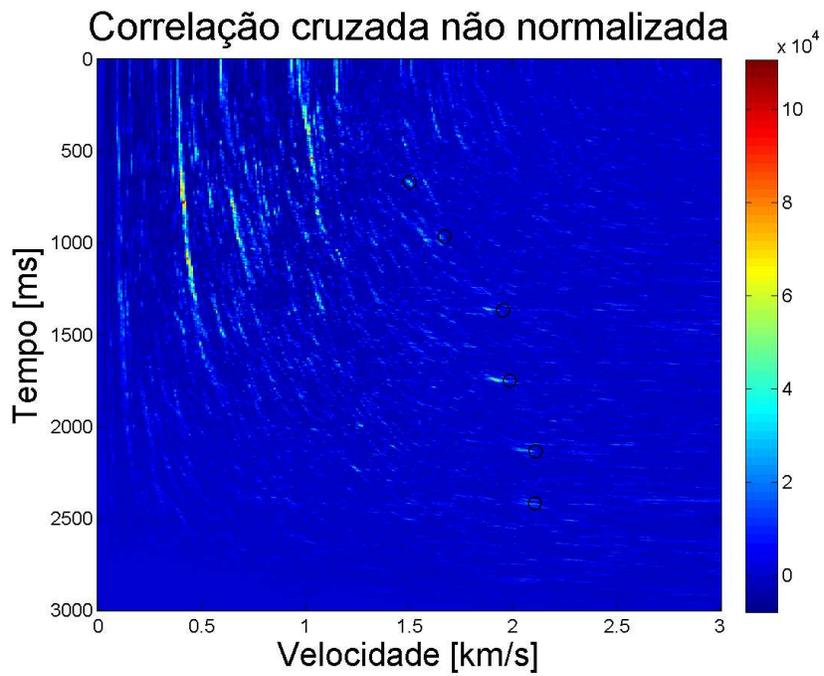
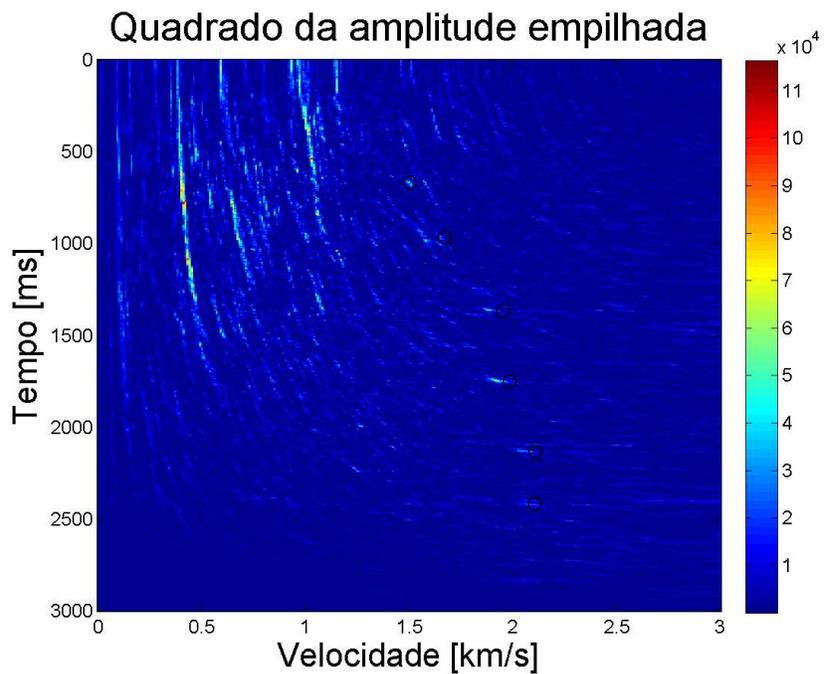


Figura 4.19: painéis A2 do Modelo 2. (a):  $SNR = 20$ . (b):  $SNR = 1$ . (c):  $SNR = 0.5$ .



(a)



(b)

Figura 4.20: Espectros de velocidade do Modelo 2 para  $SNR = 0.5$ . (a): correlação cruzada não-normalizada. (b): quadrado das amplitudes empilhadas.

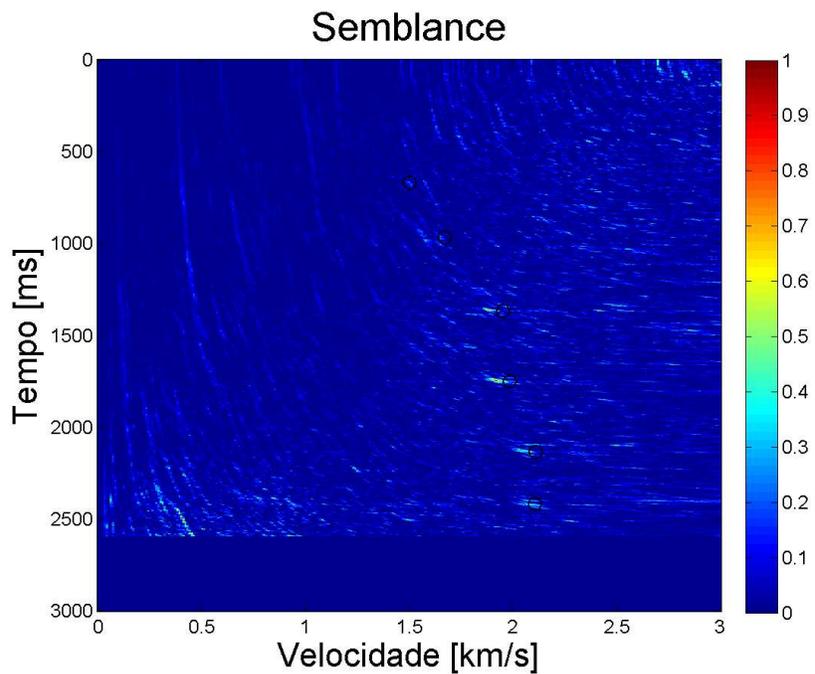
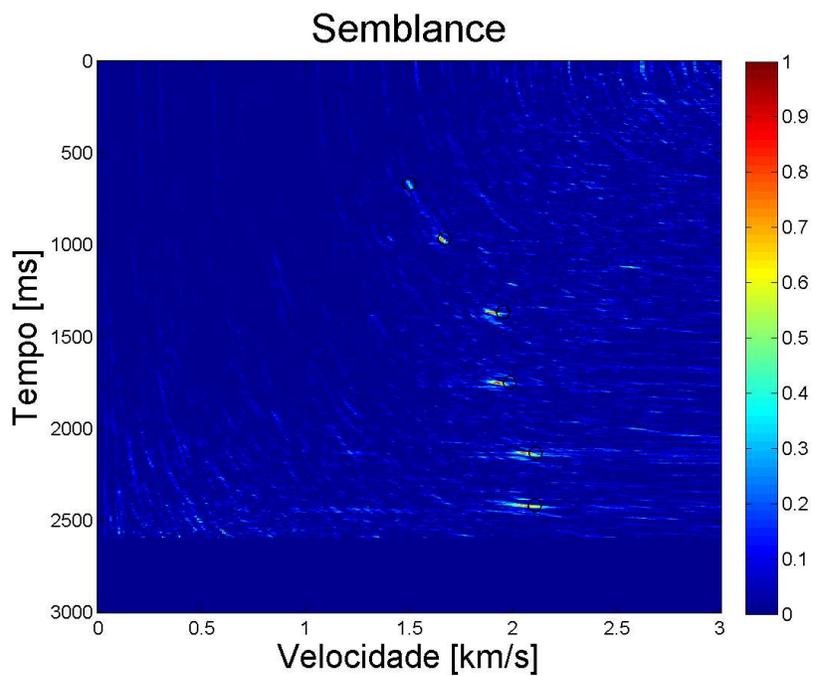
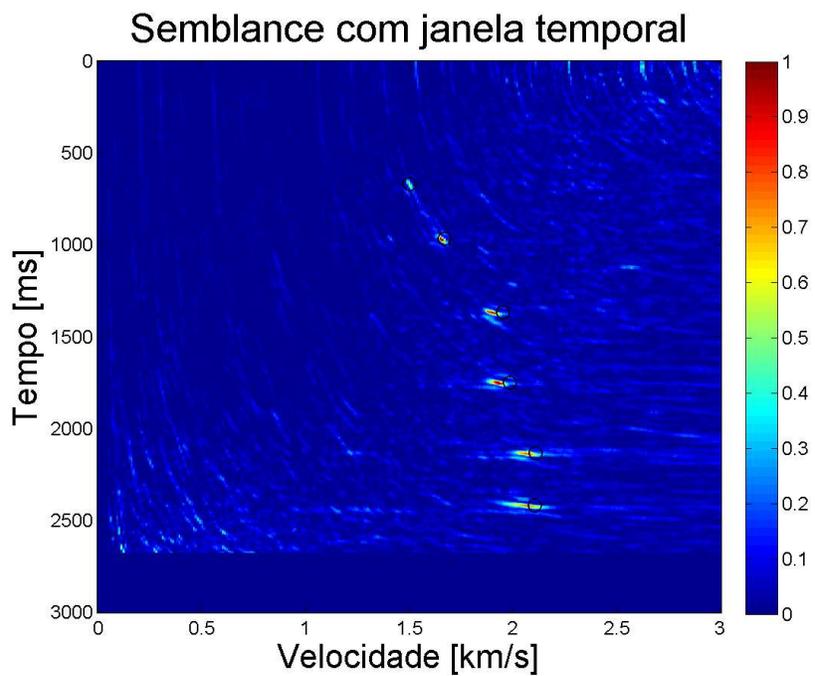
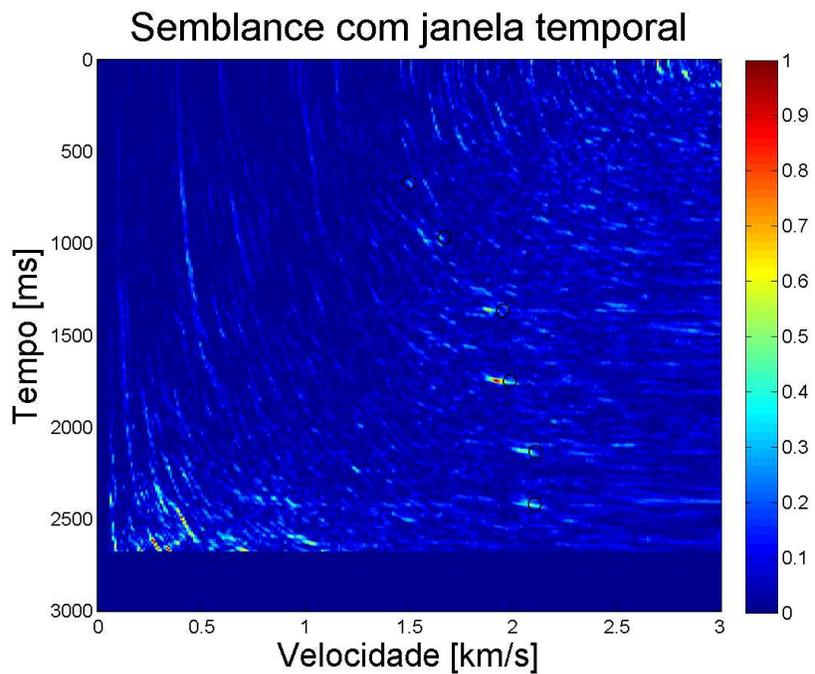


Figura 4.21: Painéis “com cortes” com *Semblance* por espalhamento do Modelo 2. (a):  $SNR = 1$ . (b):  $SNR = 0.5$ .

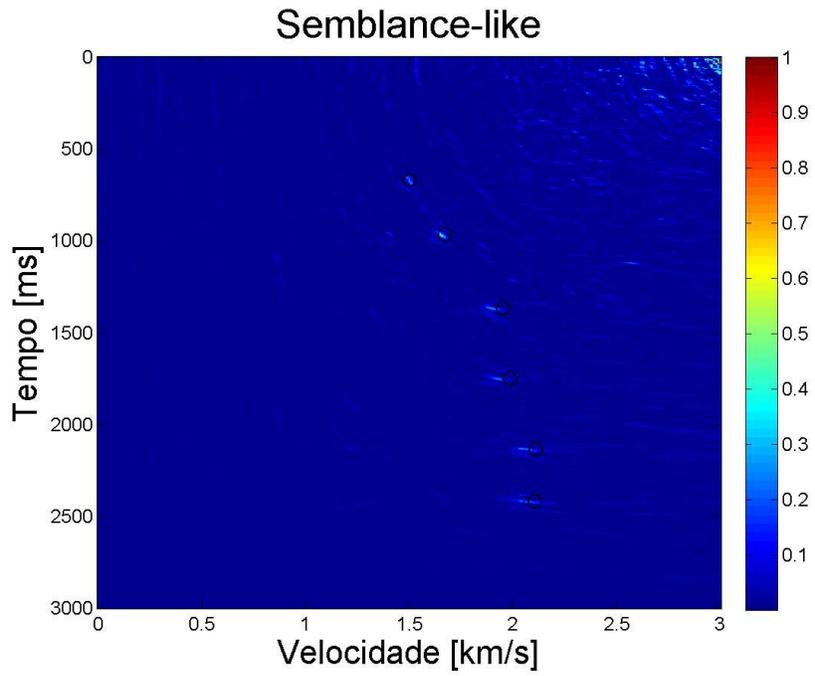


(a)

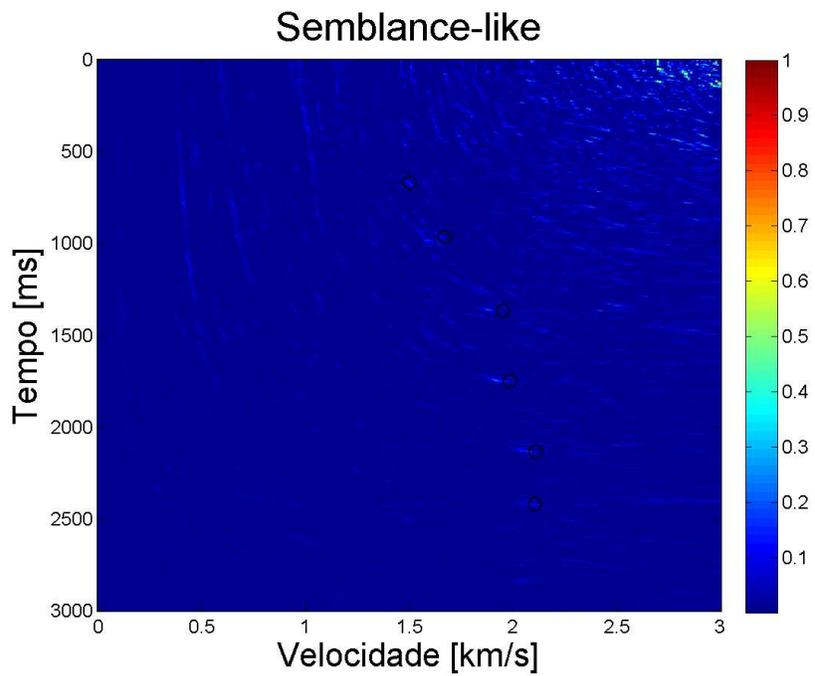


(b)

Figura 4.22: espectros de velocidades “com cortes” com *semblance* com janela temporal de 20 *ms* do Modelo 2. (a):  $SNR = 1$ . (b):  $SNR = 0.5$ .



(a)



(b)

Figura 4.23: *Semblance-like* do Modelo 2. (a):  $SNR = 1$ . (b):  $SNR = 0.5$ .

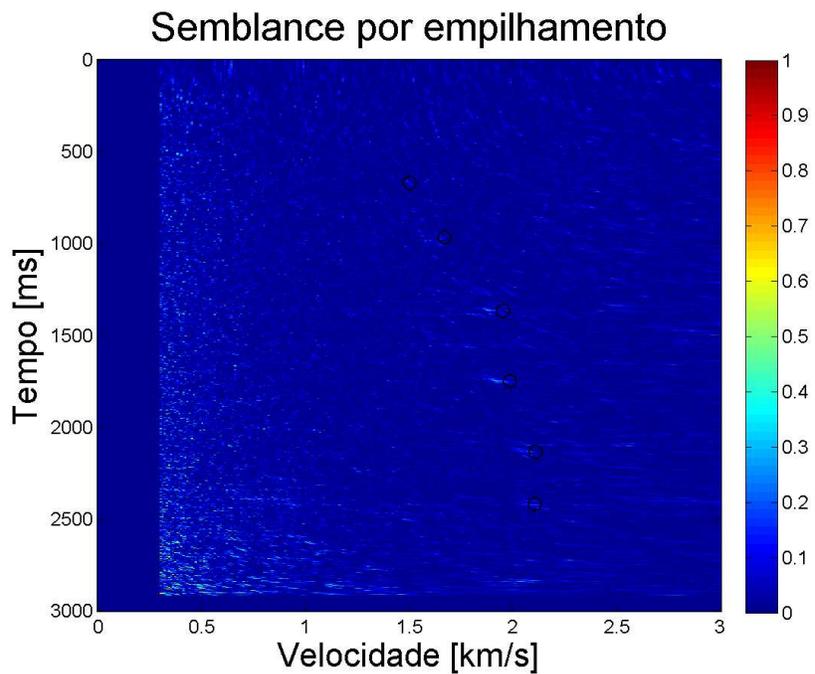
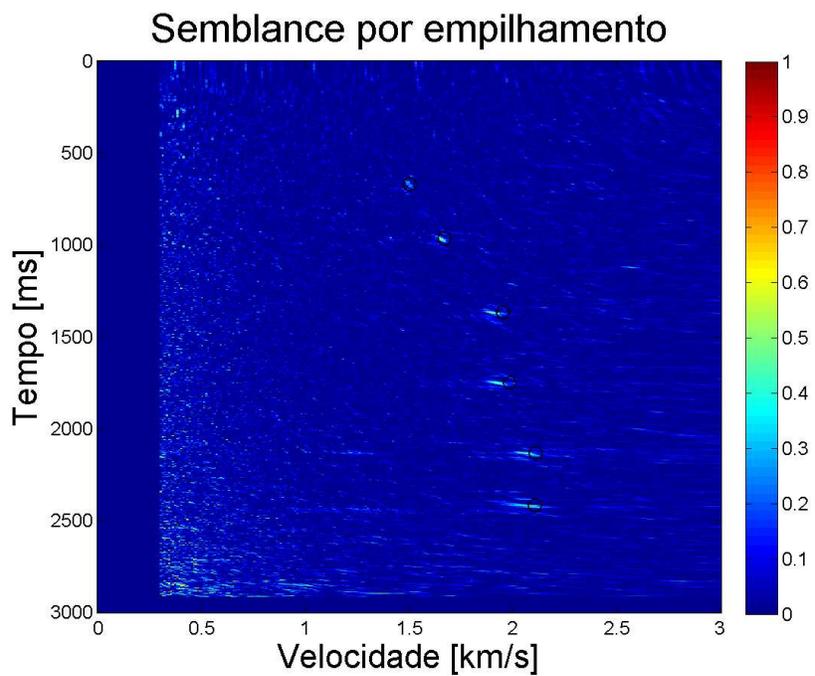
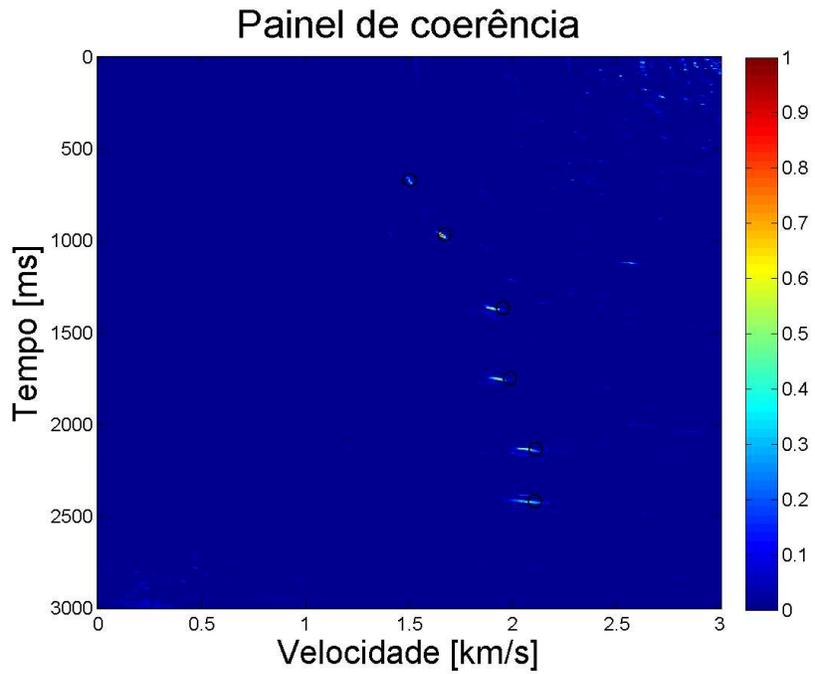
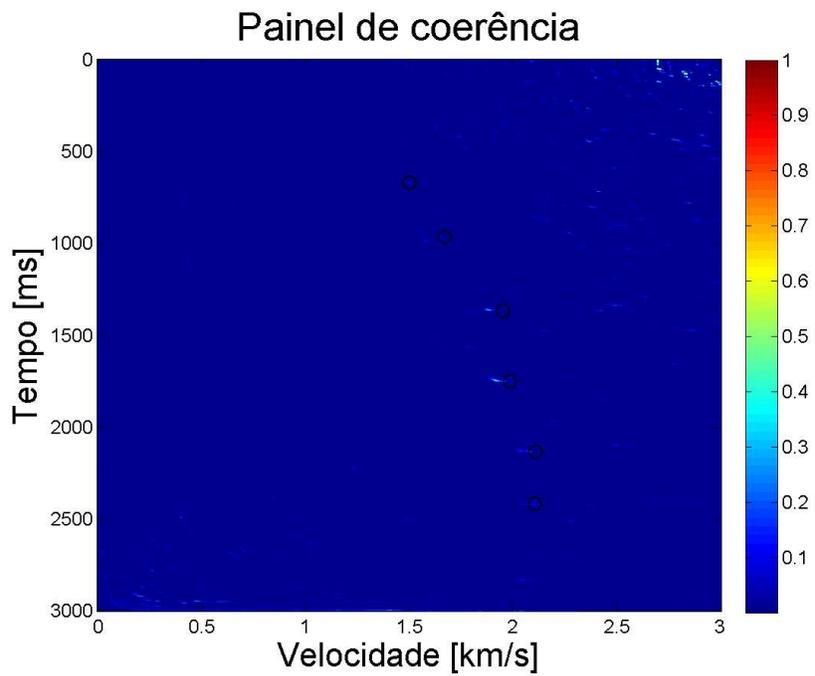


Figura 4.24: *Semblance* por empilhamento “com cortes” do Modelo 2. (a):  $SNR = 1$ . (b):  $SNR = 0.5$ .



(a)



(b)

Figura 4.25: Multiplicação dos painéis  $S'$  por  $Sl$ . (a):  $SNR = 1$ . (b):  $SNR = 0.5$ .

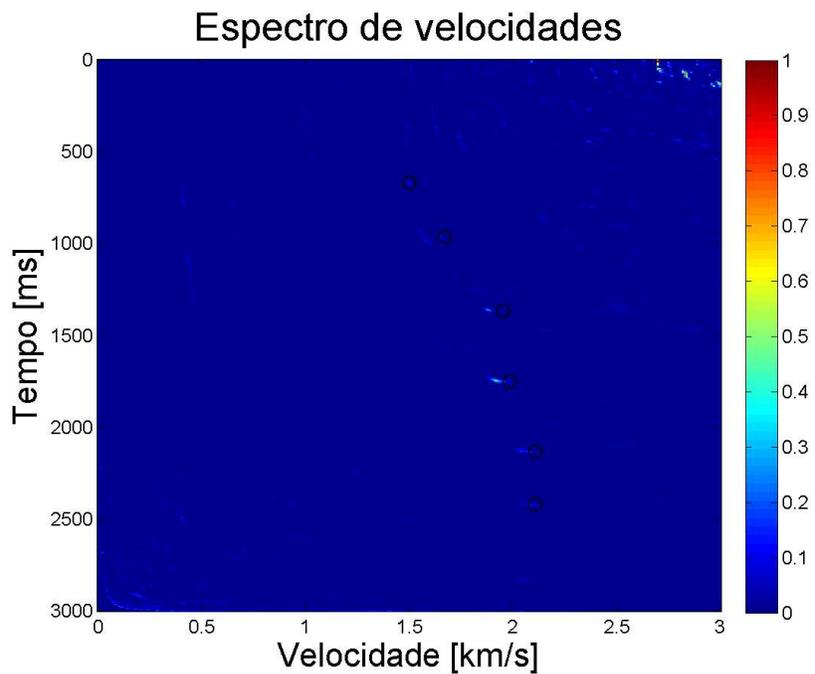
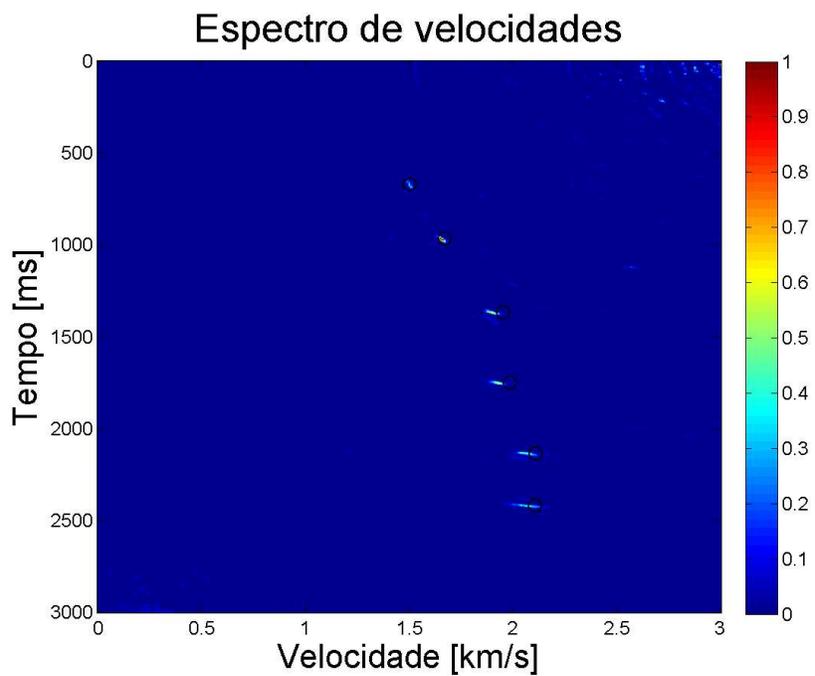


Figura 4.26: Multiplicação dos painéis S por Sl. (a):  $SNR = 1$ . Neste caso a janela temporal é de 20 ms. (b):  $SNR = 0.5$ . Neste caso a janela temporal é de 28 ms.

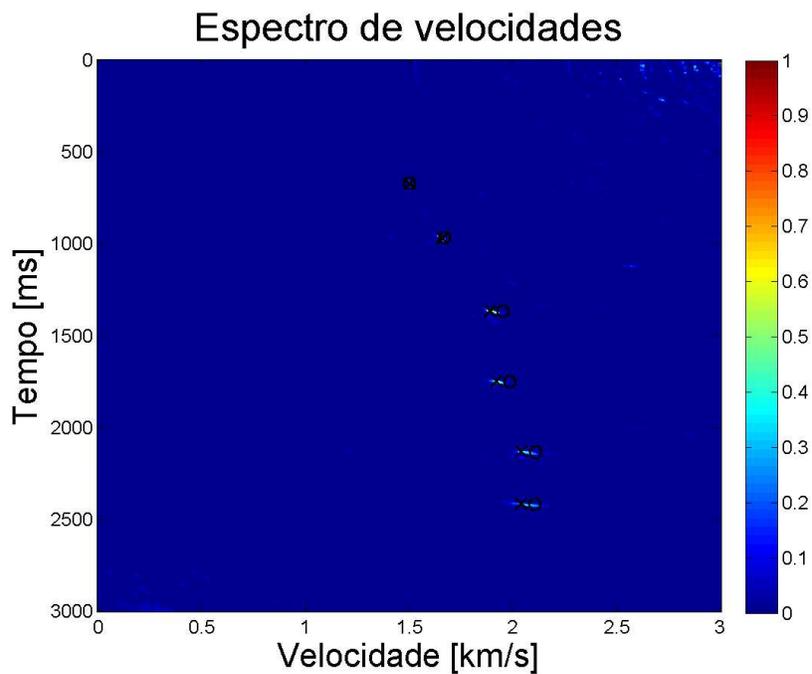


Figura 4.27: Multiplicação dos painéis S por  $S_l$ ,  $SNR = 1$ . Os valores dos picos de coerência estão marcados por um 'X'; valores teóricos para  $t_0$  e  $v_{RMS}$ , por um círculo.

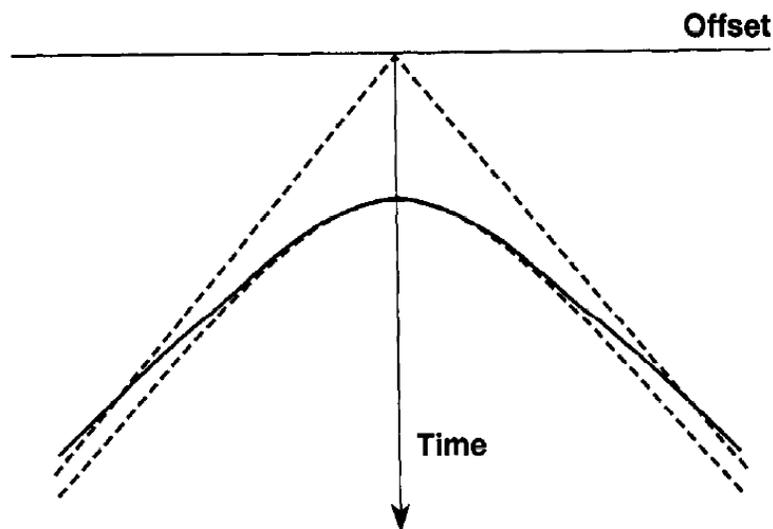


Figura 4.28: Comparação entre o tempo de trânsito hiperbólico ou “Dix” (linha tracejada) e aquele real (linha cheia). Figura retirada de Castle (1994).

---

## 5 Conclusões

---

A análise de velocidade convencional baseia-se no tempo de trânsito hiperbólico e no procedimento de empilhamento de amplitudes para a construção de espectros de velocidade. Este trabalho propôs uma mudança ao implementar a análise de velocidade sob o paradigma de espalhamento. Duas metodologias de espalhamento foram propostas: espalhamento da amplitude total e espalhamento por densidade de amplitude constante. As duas metodologias e as diferentes medidas de coerência implementadas a partir destas foram testadas em dois modelos diferentes. A partir dos resultados apresentados, pode-se constatar que o processo de análise de velocidade pelo método de espalhamento apresentou resultados bastante promissores.

Primeiramente, os valores teóricos foram alcançados com resultados satisfatórios. Em ambos os casos, espalhamento da amplitude total e espalhamento por densidade constante, os picos de coerência estão em ótimo acordo com os valores teóricos para as velocidades RMS. No Modelo 1, a concordância é quase perfeita, o que é explicado pelo fato de ter se usado tempos hiperbólicos na geração dos dados sintéticos. As velocidades RMS aparecem exatamente no contexto da aproximação hiperbólica para as reflexões. Já no Modelo 2, as velocidades obtidas são ligeiramente menores que àquelas RMS, o que evidencia o fato de que os tempos de trânsito para esse modelo não foram calculados com a expressão do tempo de trânsito hiperbólico.

Além disso, fica bastante evidente a equivalência entre o método de espalhamento da amplitude total e o empilhamento usando-se o *semblance*, levando a crer, portanto, que o método por empilhamento pode ser substituído pelo método de espalhamento sem prejuízo. Interessante notar que esta equivalência se dá até nos pontos fracos inerentes à implementação, ou seja, os dois métodos apresentaram problemas de falsos picos em regiões do espectro onde se observa poucos depósitos, no método de espalhamento, ou poucos pontos empilhados, no outro método.

Por outro lado, nota-se que o espalhamento por densidade de amplitude leva a uma medida de coerência diferente do *semblance*, medida aquela chamada, aqui, de *semblance-like*. Essa nova medida de coerência funcionou satisfatoriamente ao destacar os picos de coerência esperados. No entanto, este método também apresentou problemas de falsos picos. Como visto, esses falsos picos aparecem em regiões do espectro que correspondem a densidades de amplitudes e de quadrados de amplitude artificialmente altos, devido ao modo com são definidos e implementados.

Contudo, os pontos fracos de ambos os espectros, *semblance* por espalhamento e *semblance-like*,

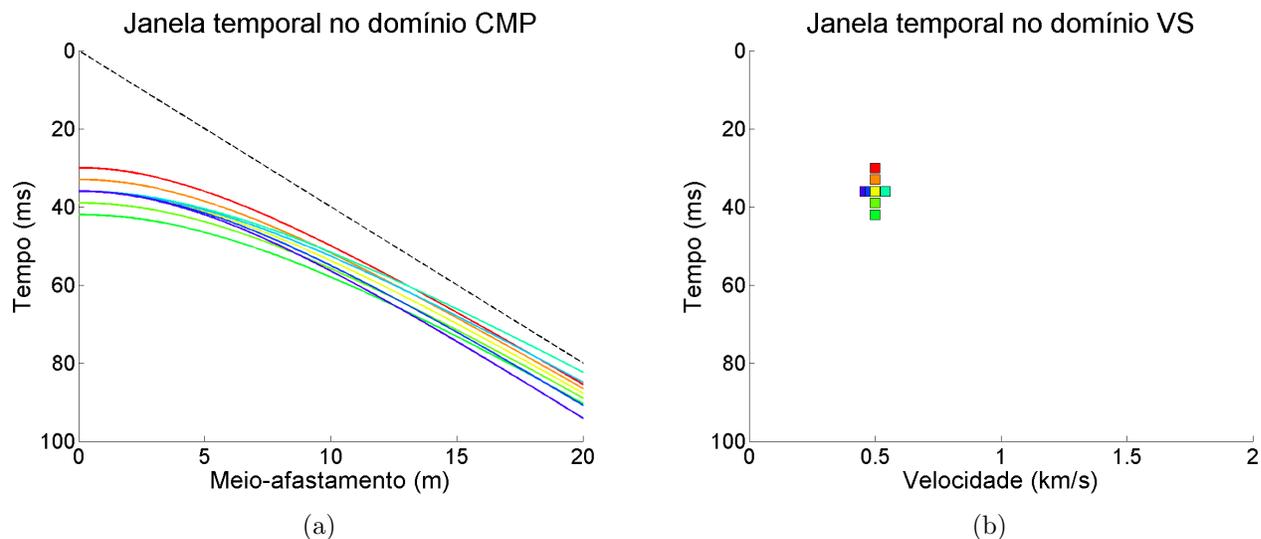


Figura 5.1: Proposta de formato da janela temporal. (a) Janela temporal no domínio CMP. Note que a janela proposta é mais próxima da janela com “largura” constante que aquela implementada neste estudo. (b) Janela temporal no domínio VS.

foram usados para se obter painéis de coerência de melhor qualidade. Como as regiões de falsos positivos em cada um dos métodos são diametralmente opostas, pode-se contruir um espectro de velocidade a partir da multiplicação desses painéis de modo que os pontos de coerência verdadeira fossem reforçados, e os de falsa, enfraquecidos ou mesmo anulados.

A janela temporal foi implementada e cumpriu seu papel de suavizar os espectros de velocidade. Contudo, a maneira que foi implementada levanta um problema e uma questão. O problema: o reforço de artefatos no espectro de velocidade na direção do tempo (vertical) criados durante o espalhamento. A questão: a janela temporal no domínio CMP tem tamanho variável, diminuindo a medida que o afastamento aumenta. Os dois pontos acima têm origem no formato da janela temporal no domínio VS. Vislumbra-se uma possibilidade de resolução dessas questões, modificando-se o formato da janela temporal. Uma proposta seria uma janela em cruz: o braço vertical da janela no domínio VS, que corresponde a possíveis eventos com diferentes tempos ZO e mesma velocidade (mesma assíntota) no domínio CMP, daria origem a uma janela neste último domínio que diminuiria com o afastamento; já o braço horizontal, que corresponde a possíveis eventos com mesmo tempo ZO e velocidades diferentes, daria origem a uma janela temporal no domínio CMP com o comportamento contrário ao da anterior (veja Figura 5.1). Sem dúvida, este ponto é um assunto que mereceria estudos mais profundos.

Outras medidas de coerência foram implementadas com sucesso. Contudo nenhuma apresen-

tou melhores resultados que o *semblance*. Um caminho natural seria a busca de implementações de outras medidas não implementadas neste trabalho.

Uma vantagem do método de espalhamento em relação ao convencional é a possibilidade de se fazer análise de velocidade em porções menores dos dados selecionadas pelo usuário. Como o espalhamento só depende da amplitude no ponto em questão, caso o usuário esteja interessado em um evento em particular, ele pode realizar a análise de velocidade só nesta porção dos dados, economizando, assim, tempo computacional e memória.

Neste trabalho foi usado, como expressão do tempo de trânsito, o tempo hiperbólico, que constitui uma aproximação de segunda ordem. Castle (1994) apresenta uma aproximação de quarta ordem para a expressão do tempo de trânsito para um meio estratificado horizontalmente: a *equação NMO da hipérbole deslocada*<sup>1</sup>. Portanto, um possível prosseguimento do trabalho apresentado é implementar a mesma metodologia usando a equação da hipérbole deslocada para o tempo de trânsito. O diferencial, neste caso, residiria no fato de que o domínio VS possuiria três dimensões.

No processamento convencional o estiramento do pulso sísmico durante a correção NMO é um problema que deve ser contornado. O estudo desta questão dentro do paradigma de espalhamento deve ser feito para que se saiba se existe este problema, a extensão dele, e como contorná-lo.

Outro possível prosseguimento é utilizar o processo de espalhamento para reconstrução e/ou filtragem de ruídos coerentes como, por exemplo, extração de múltiplas. do mesmo modo que é possível a transformação, feita por espalhamento, do domínio dos dados para o domínio do espectro de velocidades, o caminho inverso pode ser feito. O tempo de trânsito hiperbólico pode ser visto como a curva de espalhamento de “dados” que estão do domínio VS. Pode-se construir um espectro de velocidade a partir de algum dado sísmico, fazer as modificações neste domínio e, usando-se uma função peso adequada, espalhar de volta as “amplitudes”, recontruindo os dados já filtrados.

Por fim, a implementação da análise de velocidade por espalhamento permite vislumbrar a realização, em um só processo, da correção DMO e da análise de velocidade propriamente dita, já que a correção DMO se trata, em última instância, de um espalhamento. Para tal, precisaria-se reelaborar a expressão da curva de espalhamento levando-se em conta a correção DMO, de modo a espalhar a energia dos eventos em um espectro de velocidade corrigido. Com este procedimento, seria possível, em um único passo, determinar velocidades, independentemente da inclinação do refletor.

---

<sup>1</sup>D. i. “*shifted hyperbola NMO equation*”.

---

# A Aproximação hiperbólica para o tempo de trânsito

---

Conforme Dix (1955), inicialmente será feito o cálculo para o caso de duas camadas delimitadas por interfaces horizontais e planas. A partir deste caso, é feita a generalização para o caso de  $n$  camadas. Considere o modelo mostrado na Figura A.1 em que  $v_1$  e  $v_2$  são as velocidades sísmicas de propagação das respectivas camadas, e  $\Delta z_1$  e  $\Delta z_2$  são suas espessuras.

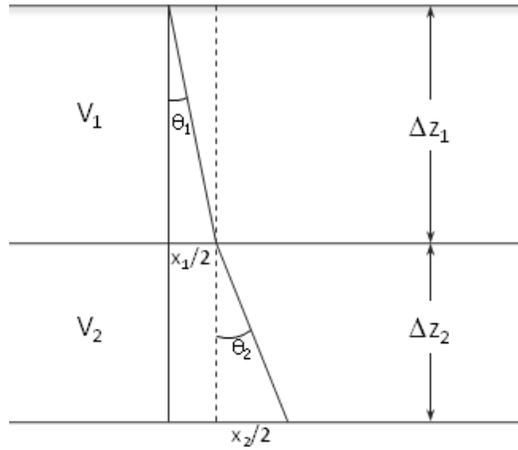


Figura A.1: Modelo de subsuperfície com duas camadas homogêneas delimitadas por interfaces planas e horizontais.

Devido a simetria do problema, o tempo de trânsito para a reflexão é uma função par. Assim, a aproximação em torno de  $x = 0$  apresenta somente potências pares de  $x$ . O resultado encontrado na Seção 2.1.1 para o tempo de trânsito para um refletor horizontal e plano sugere a procura de uma expressão do tipo hiperbólica mostrada abaixo:

$$t^2 \approx t_0^2 + \frac{x^2}{v_R^2}, \quad (\text{A.1})$$

que corresponderia a uma aproximação de 2º ordem para o tempo de trânsito da reflexão no meio em questão. Na expressão acima,  $t_0$  é tempo ZO, portanto,  $t_0 = \Delta t_1 + \Delta t_2$ .  $\Delta t_n$  é a “espessura”, em tempo, da  $n$ -ésima camada definida por  $\Delta z_n = \Delta t_n v_n / 2$  sendo  $\Delta z_n$  a espessura da  $n$ -ésima

camada conforme mostrado na Figura A.1. Resta, ainda, saber a definição e significado de  $v_R$ . Para se obter o valor exato do tempo de trânsito, ao invés de  $v_R$  constante, este termo deveria ser uma função do afastamento, conforme Dix (1955), ou outros termos da série que descreve, de maneira exata, o tempo de trânsito neste modelo, deveriam ser levados em consideração, conforme Castle (1994).

Primeiramente, deve-se estabelecer a relação entre o afastamento total  $x_1 + x_2$  e a espessura de cada camada. Da Figura A.1 tem-se a seguinte relação:

$$x_1 + x_2 = \Delta t_1 v_1 \tan \theta_1 + \Delta t_2 v_2 \tan \theta_2. \quad (\text{A.2})$$

Impondo-se a condição de pequeno afastamento pode-se aproximar as tangentes de  $\theta_1$  e  $\theta_2$  pelos seus senos, obtendo-se, assim,

$$x_1 + x_2 \approx \Delta t_1 v_1 \sin \theta_1 + \Delta t_2 v_2 \sin \theta_2. \quad (\text{A.3})$$

Usando-se a relação de Snell, obtém-se

$$x_1 + x_2 \approx \Delta t_1 v_1 \sin \theta_1 + \Delta t_2 v_2^2 \sin \theta_1 / v_1, \quad (\text{A.4})$$

$$x_1 + x_2 \approx \frac{\sin \theta_1}{v_1} (\Delta t_1 v_1^2 + \Delta t_2 v_2^2) \quad (\text{A.5})$$

Sabe-se, pela teoria de raios (Schleicher et al., 2007), que

$$\frac{\sin \theta}{v} = \frac{dt}{dx}, \quad (\text{A.6})$$

onde  $v$  é a velocidade sísmica de propagação da camada na qual o ângulo  $\theta$  é medido.

Usando-se o resultado acima, pode-se obter o valor aproximado do  $\sin \theta_1$  derivando-se a eq. (A.1) e usando-se (A.6) de modo que

$$t \frac{dt}{dx} \approx \frac{x}{v_R^2} \quad (\text{A.7})$$

$$\frac{\sin \theta}{v} \approx \frac{x}{t v_R^2} \quad (\text{A.8})$$

No receptor, devido à simetria do problema, tem-se que, para  $x = x_1 + x_2$ ,  $\theta = \theta_1$  de modo que

$$\frac{\sin \theta_1}{v_1} \approx \frac{(x_1 + x_2)}{(\Delta t_1 + \Delta t_2) v_R^2}. \quad (\text{A.9})$$

Deve-se chamar atenção a uma aproximação feita: como  $x_1 + x_2$  tende a 0 – aproximação de pequeno afastamento –,  $t$  tende a  $t_0 = \Delta t_1 + \Delta t_2$

Substituindo-se eq. (A.9) na eq. (A.5) chega-se a

$$v_R^2 = \frac{\Delta t_1 v_1^2 + \Delta t_2 v_2^2}{\Delta t_1 + \Delta t_2}. \quad (\text{A.10})$$

Este resultado pode ser generalizado, sob as mesmas hipóteses, para  $n$  camadas de modo que a eq. (A.10) toma a forma conhecida apresentada na Seção 2.1.1, eq. (2.4):

$$v_{R_n}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n v_i^2 \Delta t_i}{\sum_{i=1}^n \Delta t_i}. \quad (\text{A.11})$$

Observe que, a partir da equação acima, pode-se escrever

$$v_{R_n}^2 \sum_{i=1}^n \Delta t_i = \sum_{i=1}^n v_i^2 \Delta t_i, \quad (\text{A.12})$$

$$v_{R_{n-1}}^2 \sum_{i=1}^{n-1} \Delta t_i = \sum_{i=1}^{n-1} v_i^2 \Delta t_i. \quad (\text{A.13})$$

Subtraindo-se a segunda da primeira chega-se a conhecida *fórmula de Dix* (Seção 2.1.1, eq. (2.5))

$$v_n^2 = \frac{(v_{R_n}^2 \sum_{i=1}^n \Delta t_i - v_{R_{n-1}}^2 \sum_{i=1}^{n-1} \Delta t_i)}{\Delta t_n}. \quad (\text{A.14})$$

---

# B Funções e algoritmos implementados

---

Neste apêndice são mostrados os algoritmos implementados. Para tanto define-se o significado dos símbolos usados na descrição do algoritmos (Tabela B.1) e das variáveis de entrada, saída e das usadas no corpo dos programas (Tabelas B.2 e B.3).

Na Página 88 é mostrado o algoritmo do espalhamento da amplitude total, método usado para cálculo, por espalhamento, do *Semblance* sem janela ( $S'$ ), Correlação cruzada não-normalizada

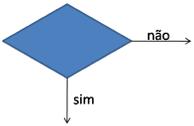
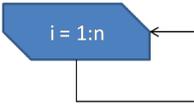
Símbolo	Ação	Descrição
	Início/fim	Marca o início ou fim do programa.
	Entrada e/ou saída de dados	Mostra quais variáveis devem ser fornecidas como dado de entrada e quais serão fornecidas como dado de saída.
	Processo	Indica um processo/ação a ser feita.
	Decisão	Mostra quais ações devem ser tomadas dependendo da resposta a uma pergunta.
	<i>Loop</i>	Indica a existência de uma repetição de ações ( <i>loop</i> ). A expressão dentro do símbolo indica a variável que controla o <i>loop</i> , valor inicial e valor final.

Tabela B.1: Símbolos usados na representação dos algoritmos.

Variável	Descrição
$t$	Vetor, com $nt$ posições, que contém os instantes de amostragem dos dados.
$h$	Vetor, com $nh$ posições, que contém os valores de meio-afastamento dos dados.
$U$	Matriz, de dimensão $(nh \times nt)$ , que contém os dados das amplitudes registradas, ou os valores de dados sintéticos.
$v$	Vetor, com $nv$ posições, que contém os valores de velocidade NMO tentativa.
$t_0$	Vetor, com $nt_0$ posições, que contém os valores de tempo ZO tentativo.
$Vmin$	Matriz, de dimensão $(nh \times nt)$ , que contém os valores da velocidade mínima da curva de espalhamento associados a cada um dos pontos do domínio CMP.
$T0max$	Matriz, de dimensão $(nh \times nt)$ , que contém os valores do tempo ZO máximo da curva de espalhamento associados a cada um dos pontos do domínio CMP.
$I$	Vetor, com $nk$ posições, que contém os índices das linhas de cada ponto não nulo da matriz $U$ .
$J$	Vetor, com $nk$ posições, que contém os índices das colunas de cada ponto não nulo da matriz $U$ .
$A$	Matriz, de dimensão $(nv \times nt_0)$ , que contém os dados do espalhamento da amplitude pelo método da amplitude total.
$A2$	Matriz, de dimensão $(nv \times nt_0)$ , que contém os dados do espalhamento do quadrado da amplitude pelo método da amplitude total.

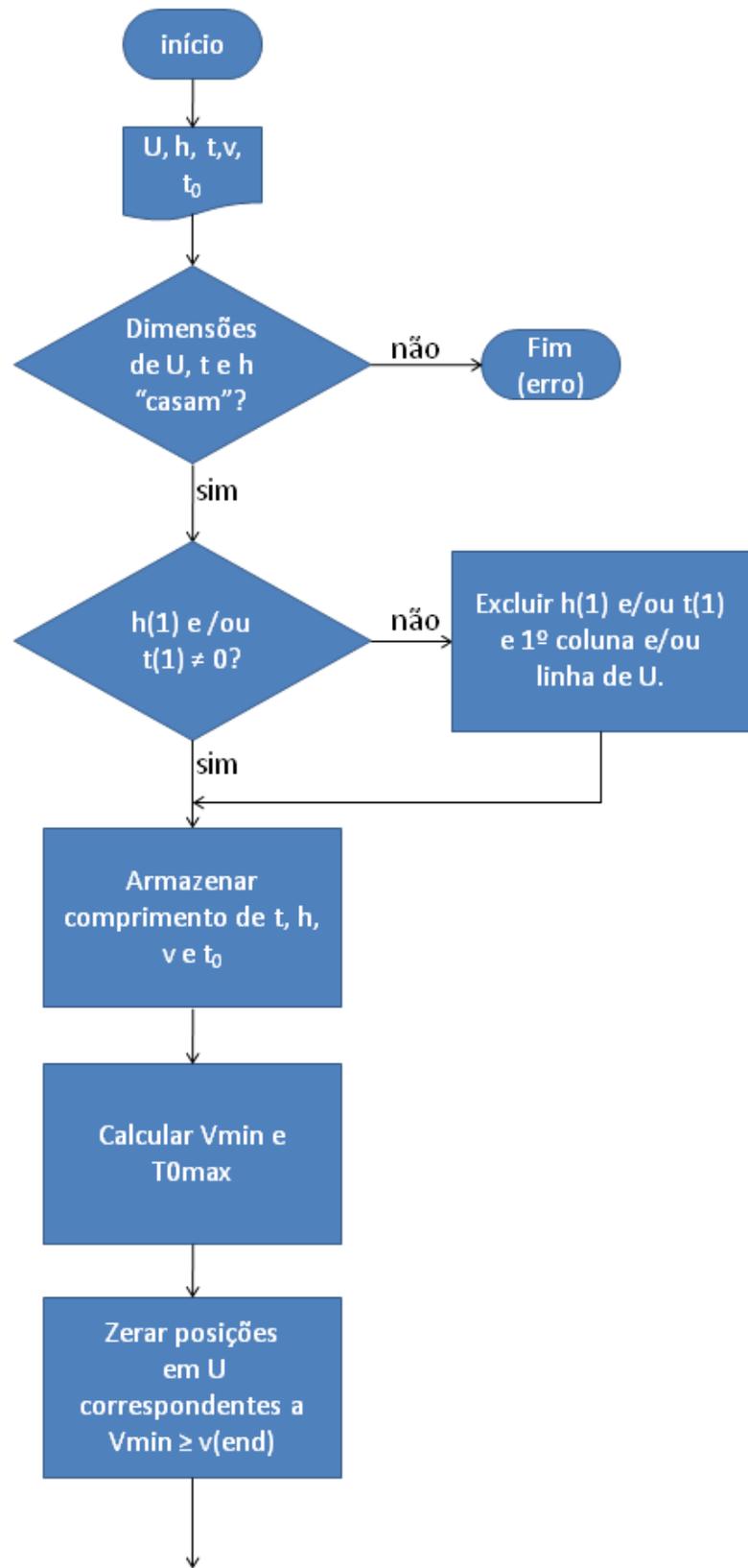
Tabela B.2: Variáveis presentes nos algoritmos de espalhamento.

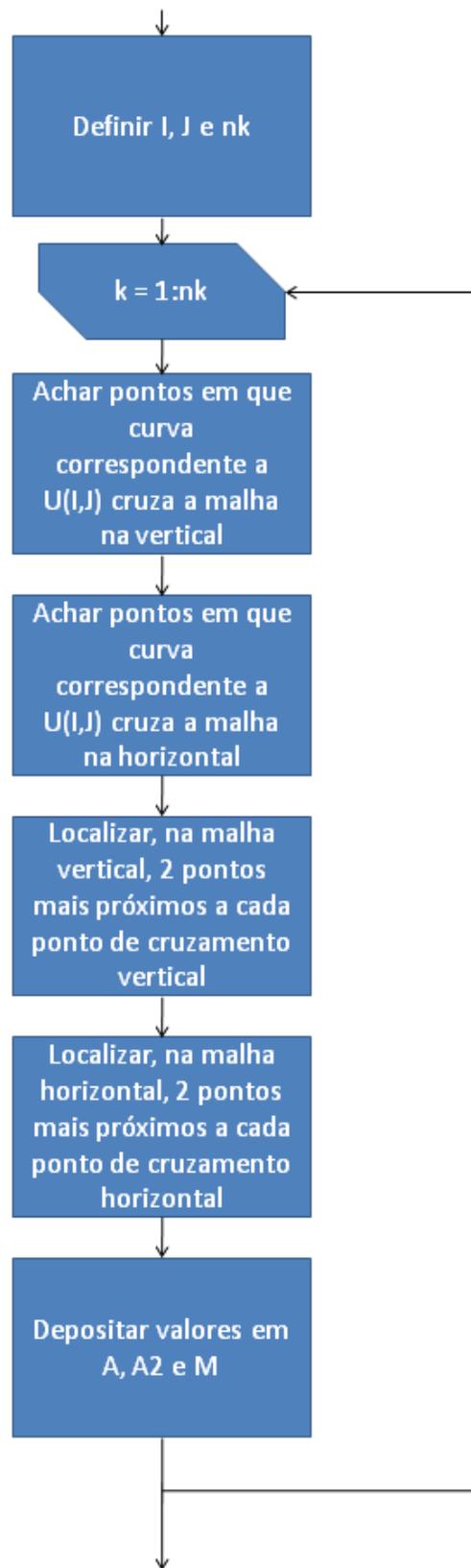
(CC) e do quadrado das amplitudes empilhadas (E).

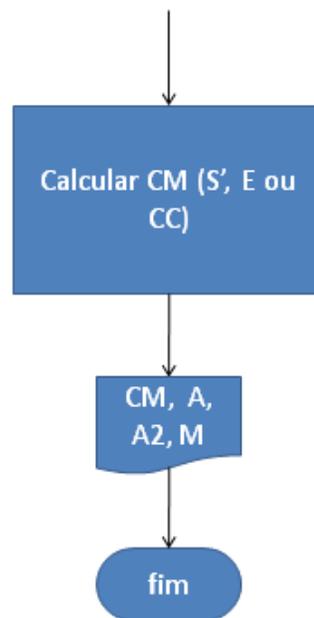
Na Página 91 é mostrado o algoritmo do espalhamento por densidade constante que é usado para calcular o espectro de velocidade por *semblance-like*.

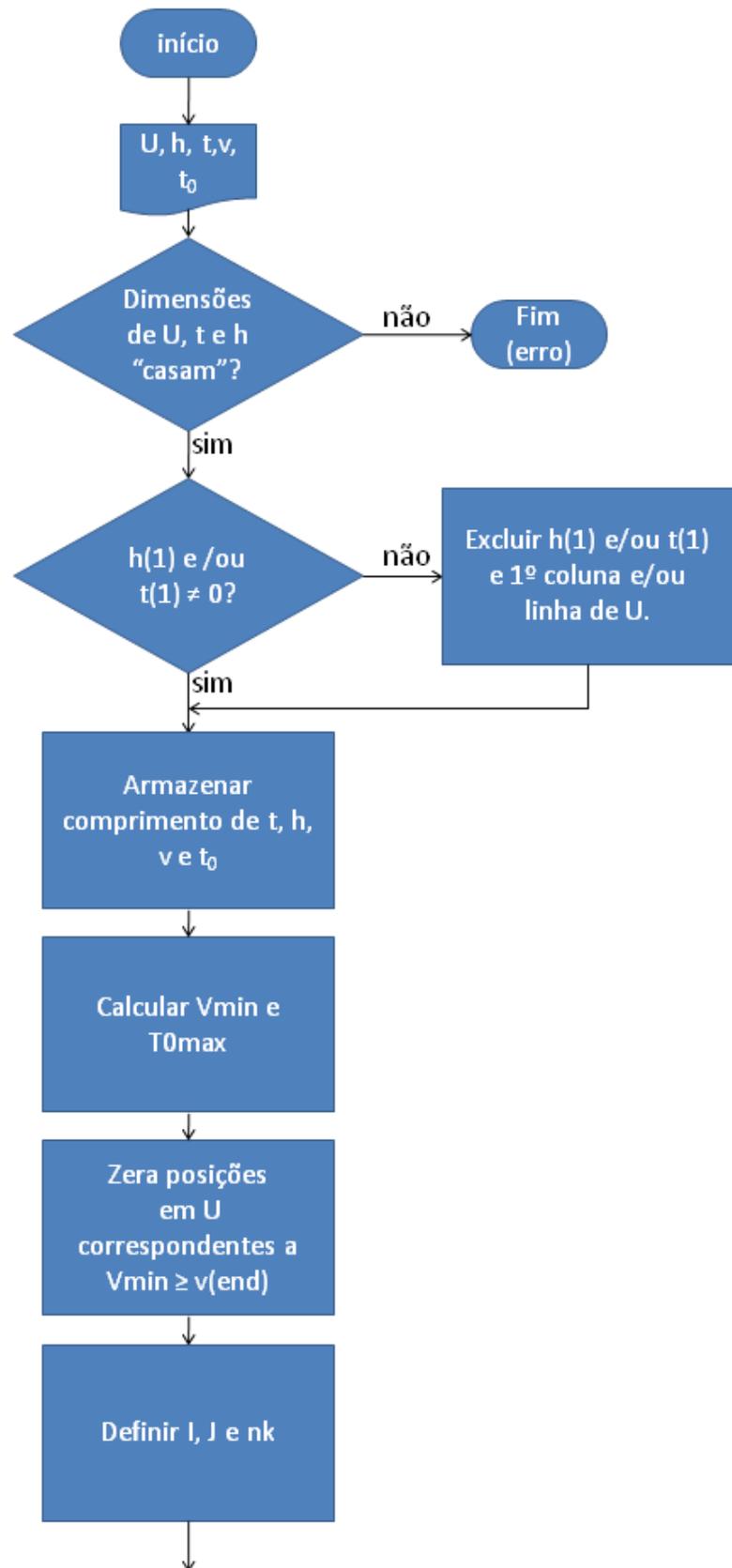
Variável	Descrição
$M$	Matriz, de dimensão $(nv \times nt0)$ , que contém o número de deposições feitas em cada ponto do domínio VS durante o espalhamento.
$CM$	Matriz, de dimensão $(nv \times nt0)$ , que contém os dados do espectro de velocidade construído por espalhamento. Pode receber valores do <i>semblance</i> , correlação cruzada não-normalizada e do quadrado das amplitudes empilhadas.
$C$	Matriz, de dimensão $(nh \times nt)$ , que contém os valores do comprimento total das curvas de espalhamento associadas a cada um dos pontos do domínio CMP.
$Ds$	Vetor, com $nDs$ posições, que os comprimentos locais ao longo de uma dada curva de espalhamento. o valor $nDs$ varia de curva para curva.
$A'$	Matriz, de dimensão $(nv \times nt0)$ , que contém os dados do espalhamento da amplitude pelo método da densidade de amplitude constante.
$A2'$	Matriz, de dimensão $(nv \times nt0)$ , que contém os dados do espalhamento do quadrado da amplitude pelo método da densidade de amplitude constante.
$Sl$	Matriz, de dimensão $(nv \times nt0)$ , que contém os dados do espectro de velocidade construído pelo espalhamento por densidade de amplitude constante, o que resulta no <i>semblance-like</i> .

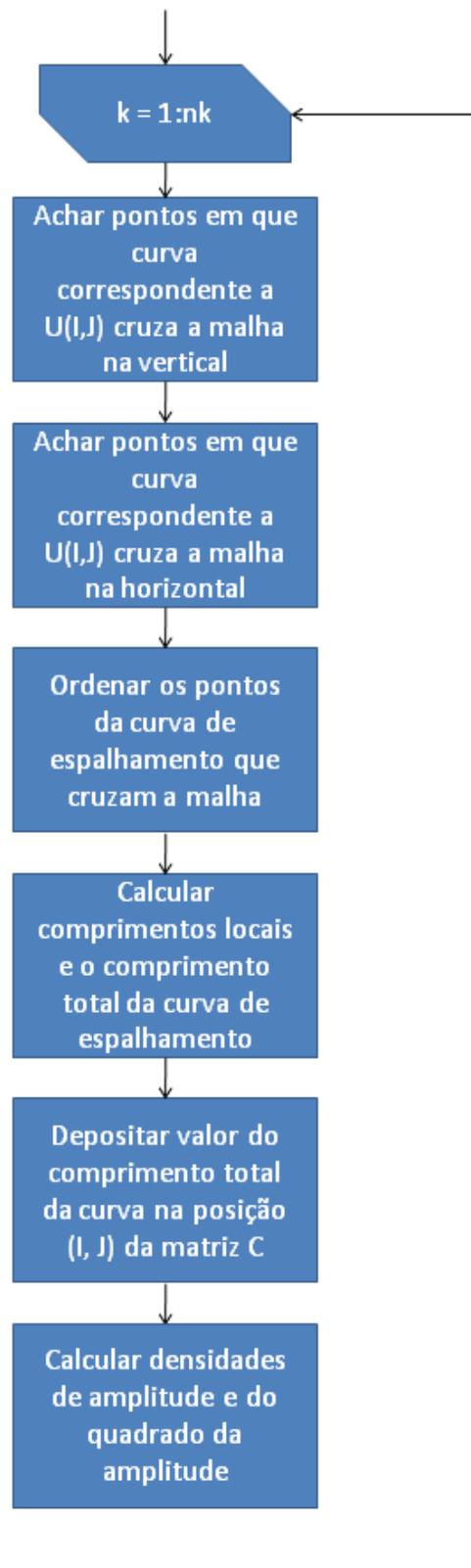
Tabela B.3: Continuação Tabela B.2

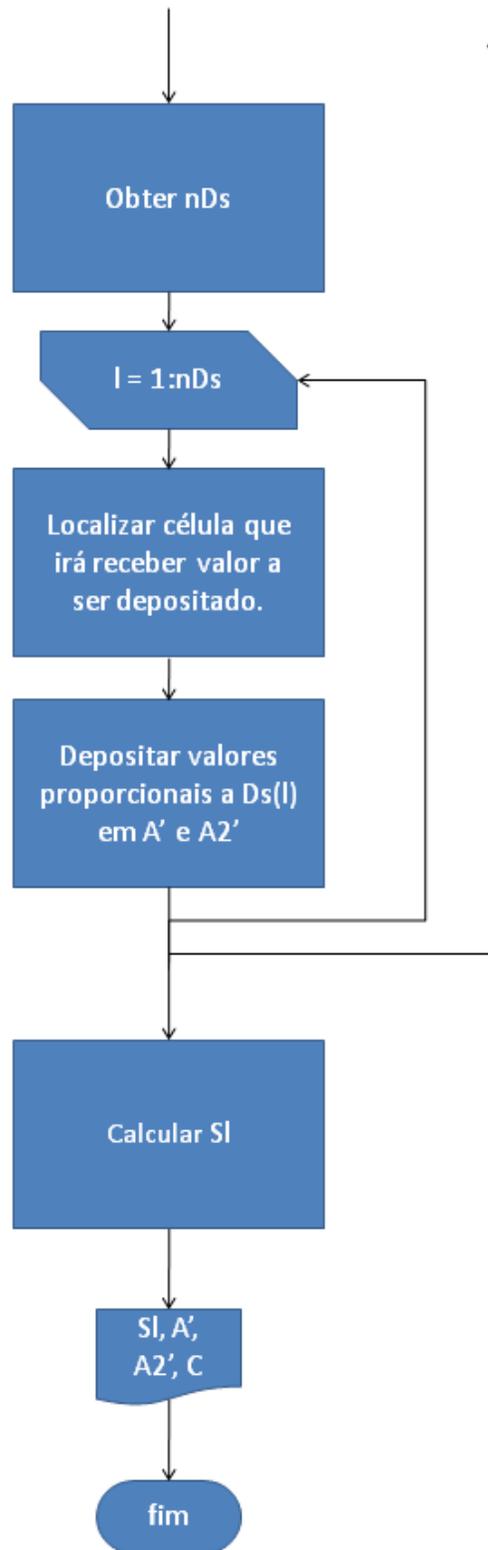












# C Painéis do Modelo 2

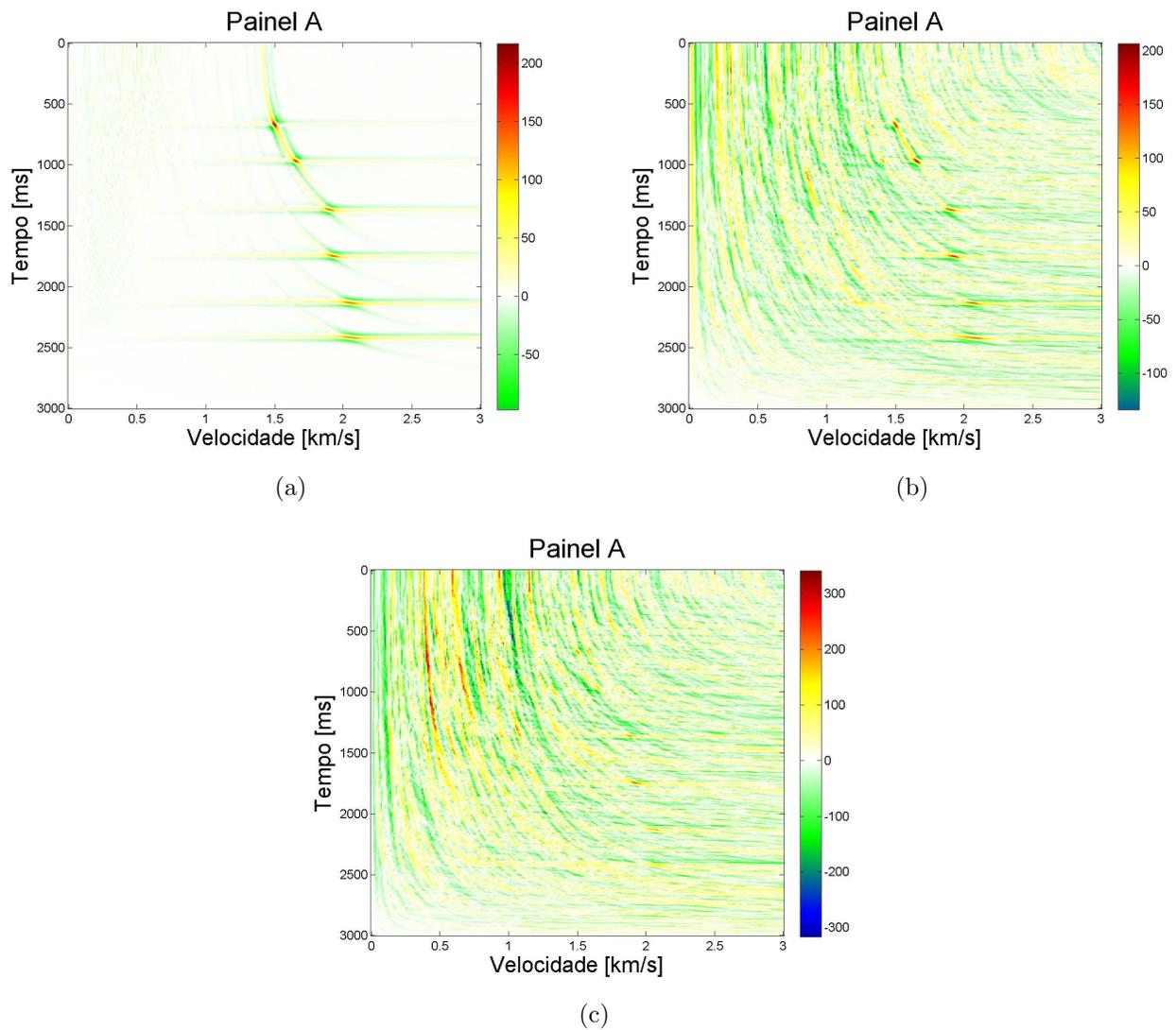


Figura C.1: painéis A do Modelo 2. (a):  $SNR = 20$ . (b):  $SNR = 1$ . (c):  $SNR = 0.5$ .

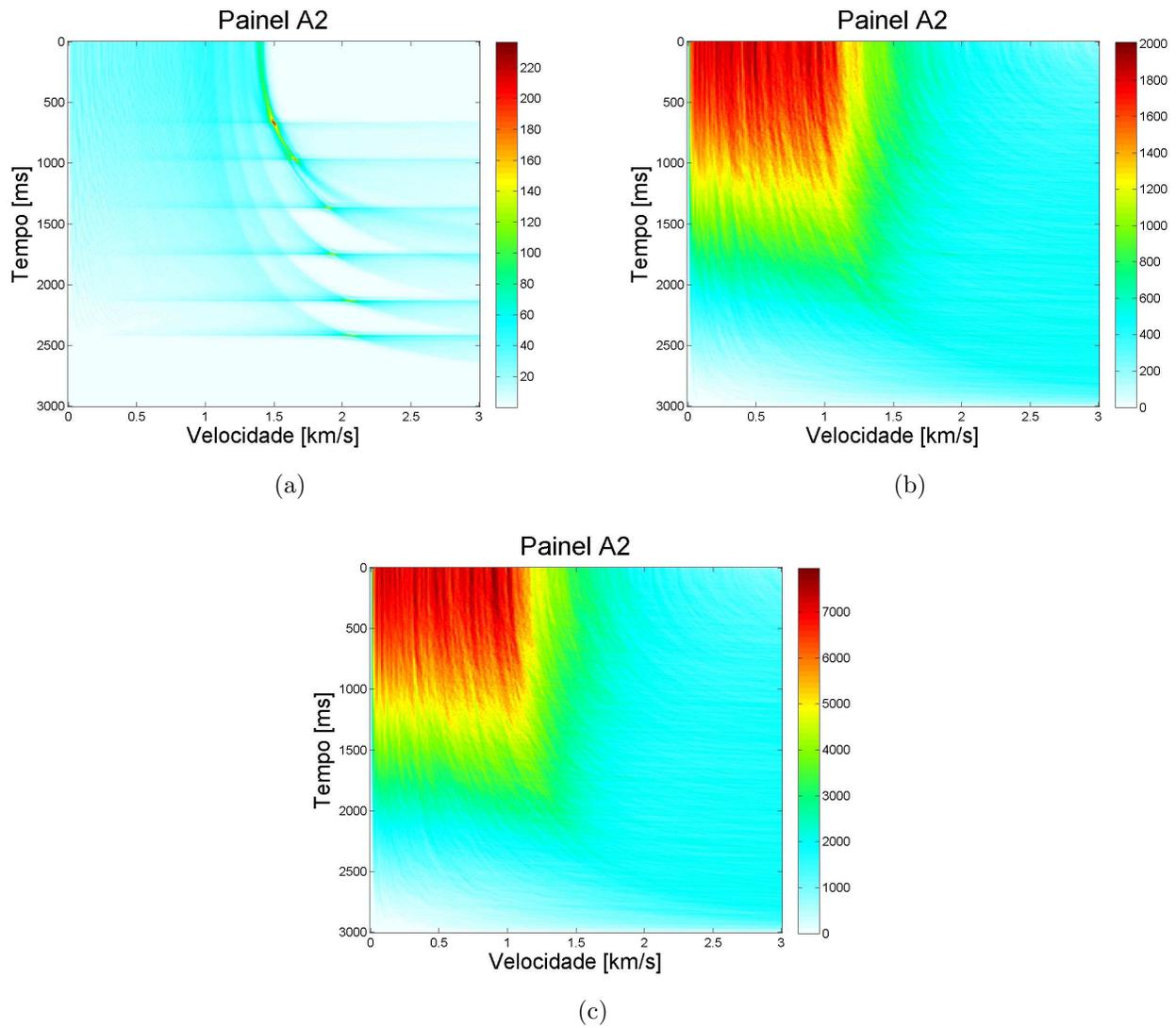


Figura C.2: painéis A2 do Modelo 2. (a):  $SNR = 20$ . (b):  $SNR = 1$ . (c):  $SNR = 0.5$ .

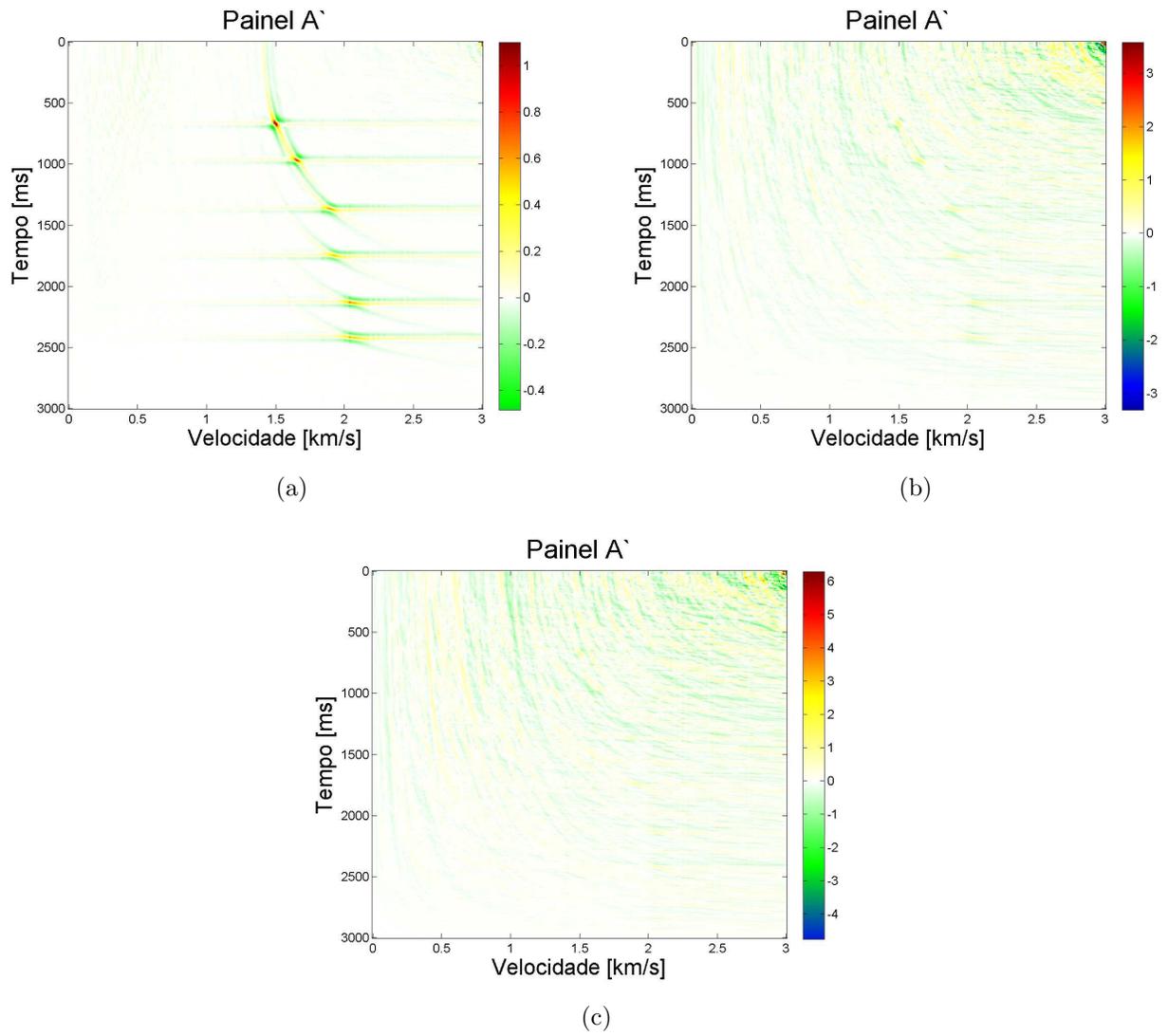


Figura C.3: painéis A' do Modelo 2. (a):  $SNR = 20$ . (b):  $SNR = 1$ . (c):  $SNR = 0.5$ .

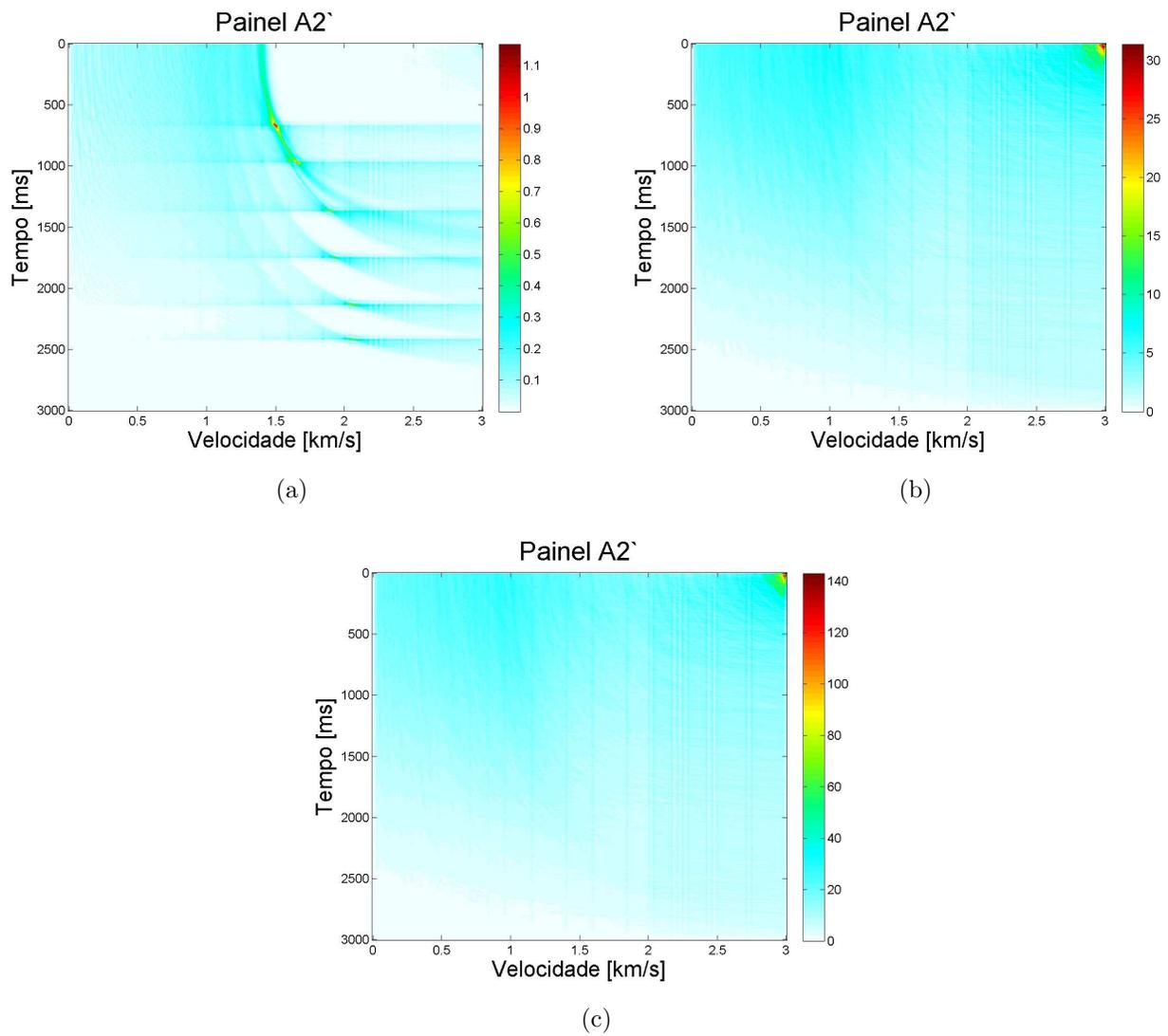


Figura C.4: painéis A2' do Modelo 2. (a):  $SNR = 20$ . (b):  $SNR = 1$ . (c):  $SNR = 0.5$ .

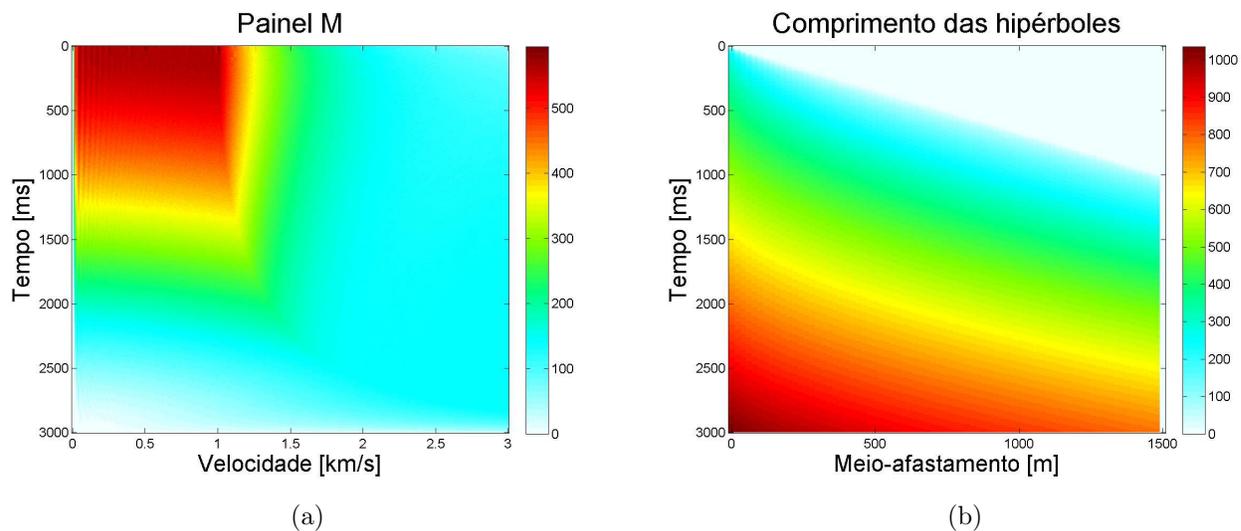


Figura C.5: (a): Painel M. (b): Painel C. Ambos para o Modelo 2.

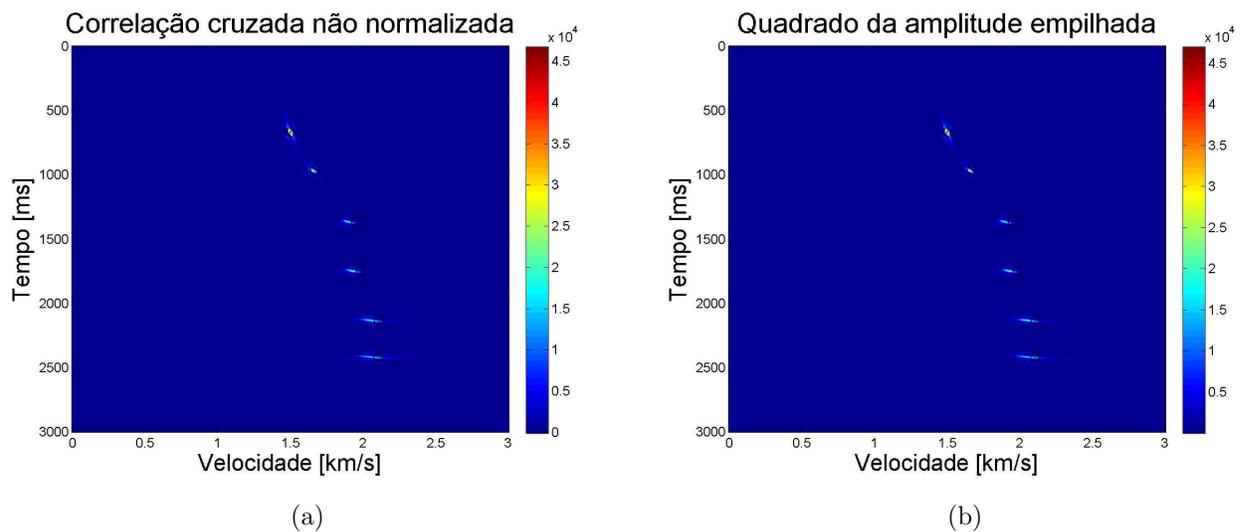


Figura C.6: Espectros de velocidade do o Modelo 2 para  $SNR = 20$ . (a): correlação cruzada não-normalizada. (b): quadrado das amplitudes espalhadas.

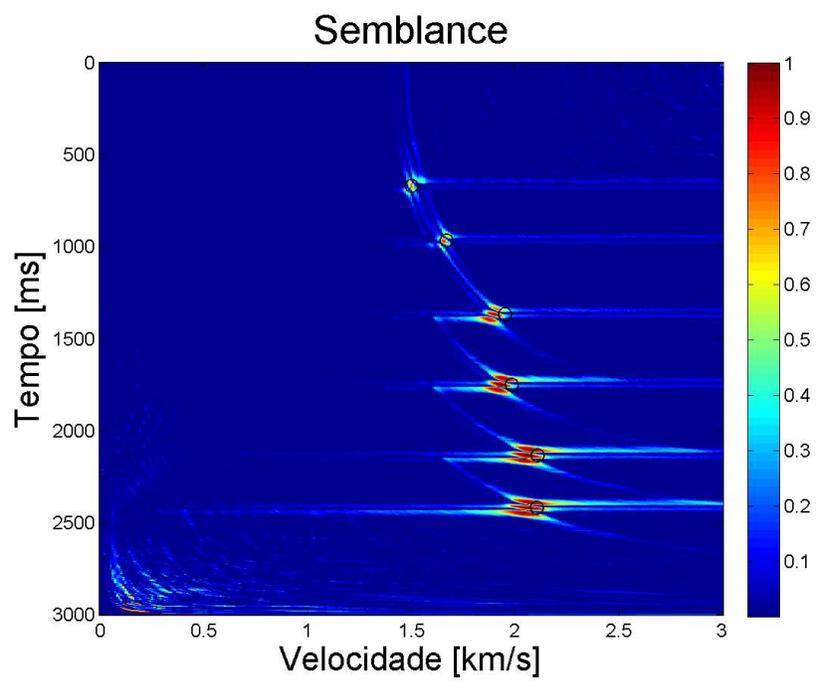
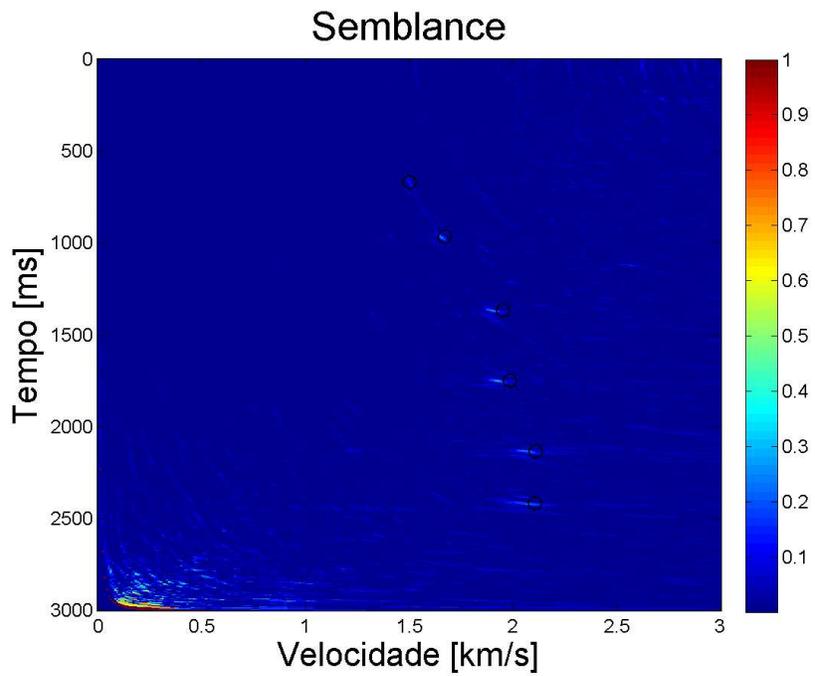
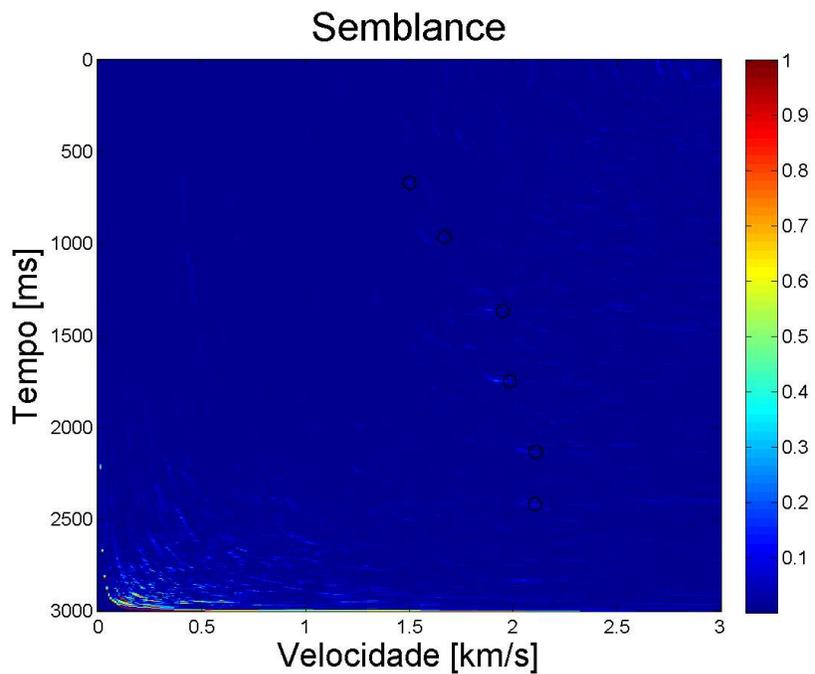


Figura C.7: *Semblance* por espalhamento, sem corte, do Modelo 2 com  $SNR = 20$ .

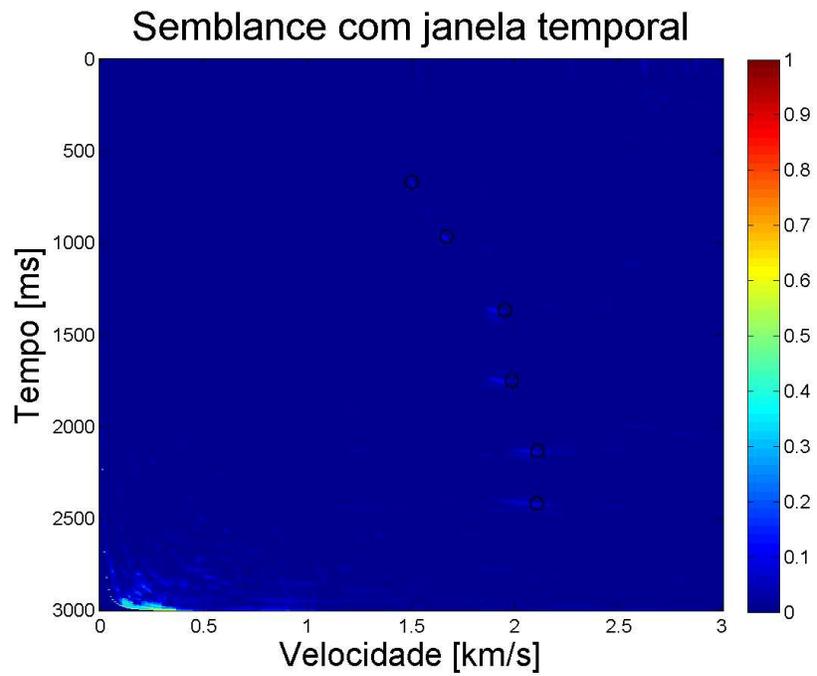


(a)

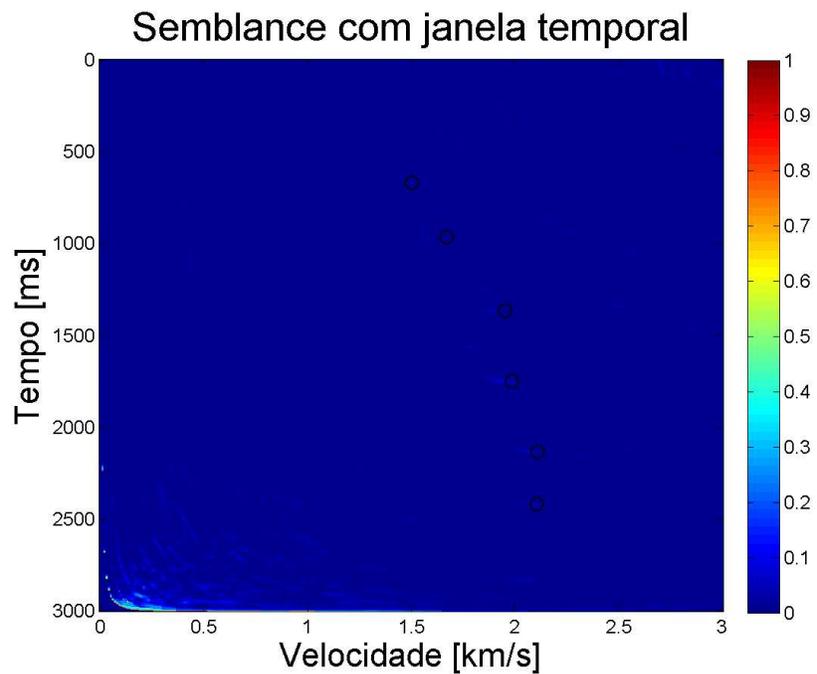


(b)

Figura C.8: *Semblance* por espalhamento do Modelo 2 sem corte. (a):  $SNR = 1$ . (b):  $SNR = 0.5$ .

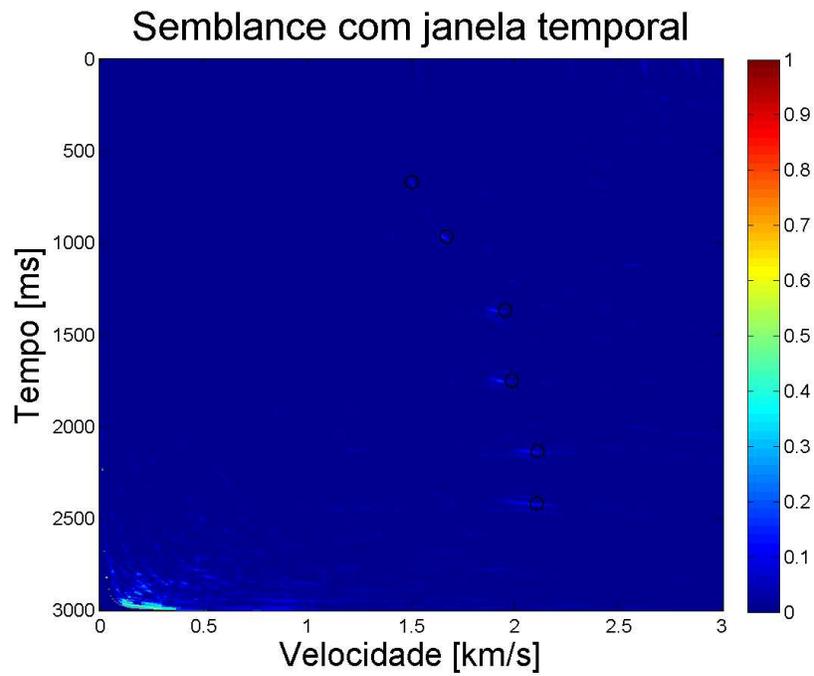


(a)

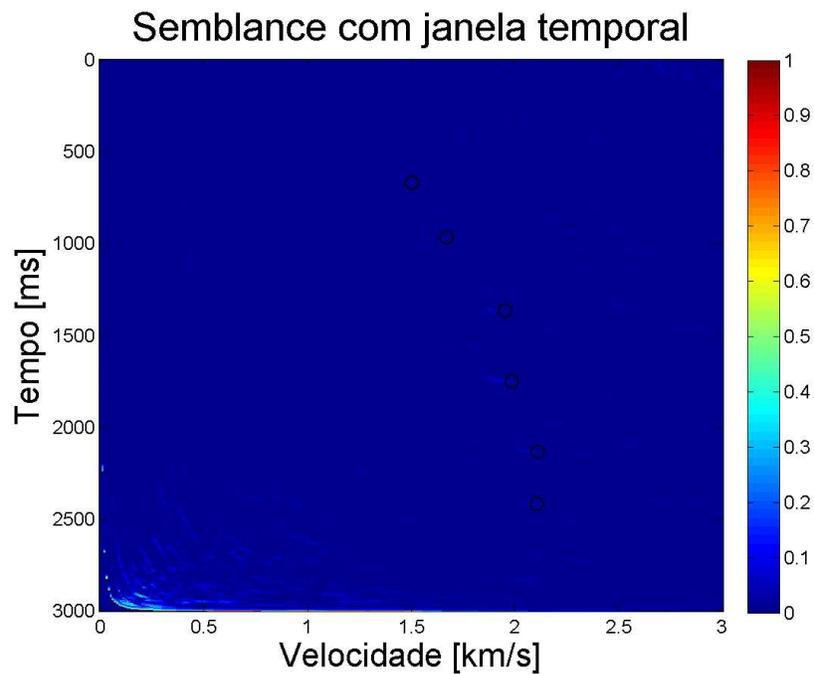


(b)

Figura C.9: Espectros de velocidades “sem cortes” com *semblance* com janela temporal de 20 ms do Modelo 2. (a):  $SNR = 1$ . (b):  $SNR = 0.5$ .

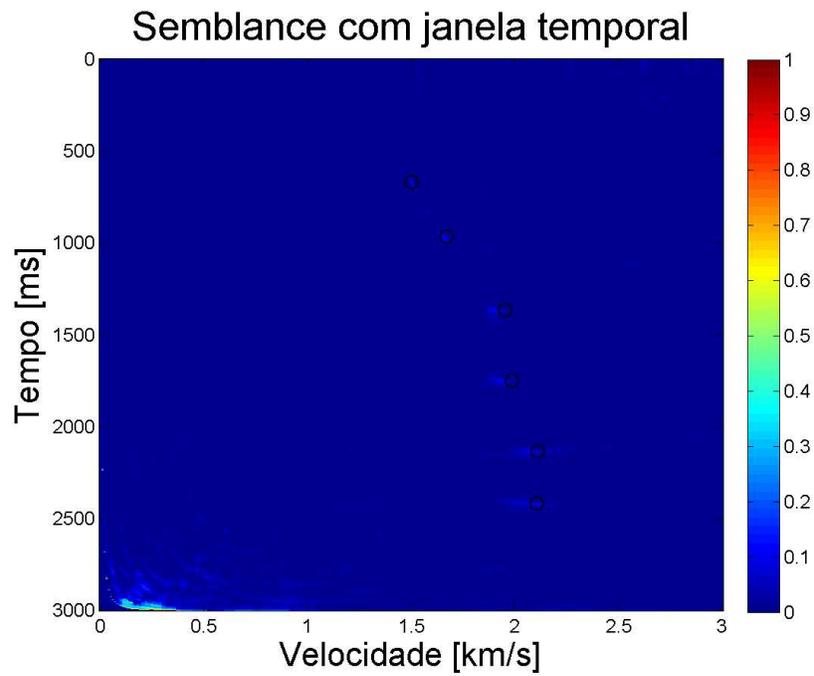


(a)

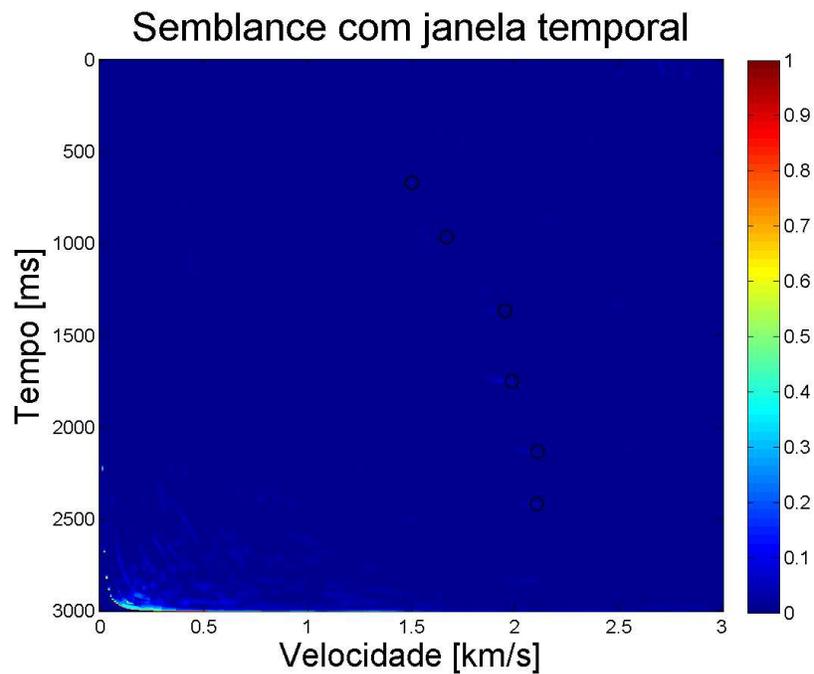


(b)

Figura C.10: Espectros de velocidades “sem cortes” com *semblance* com janela temporal de 12 ms do Modelo 2. (a):  $SNR = 1$ . (b):  $SNR = 0.5$ .



(a)



(b)

Figura C.11: Espectros de velocidades “sem cortes” com *semblance* com janela temporal de 28 ms do Modelo 2. (a):  $SNR = 1$ . (b):  $SNR = 0.5$ .

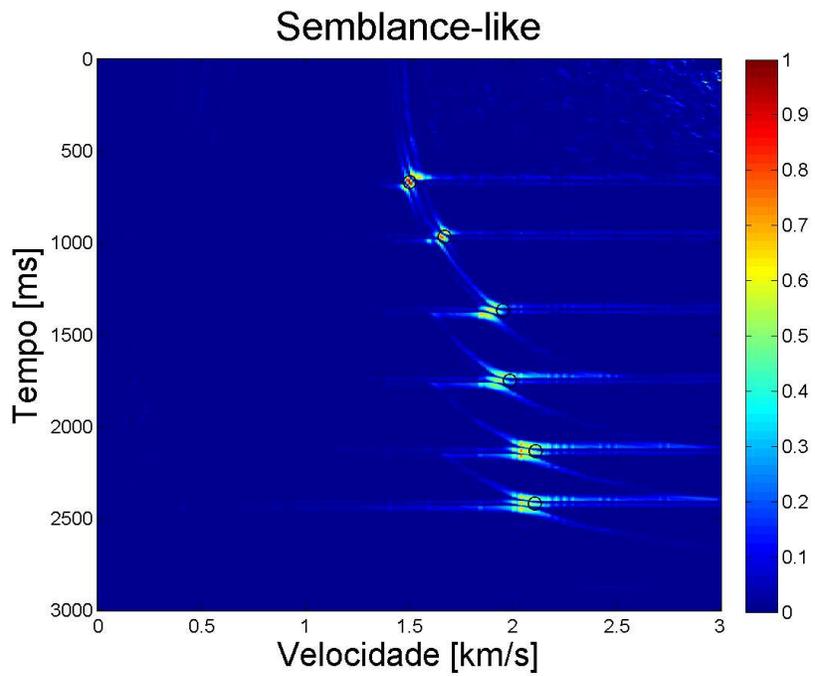


Figura C.12: *Semblance-like* do Modelo 2.  $SNR = 20$ .

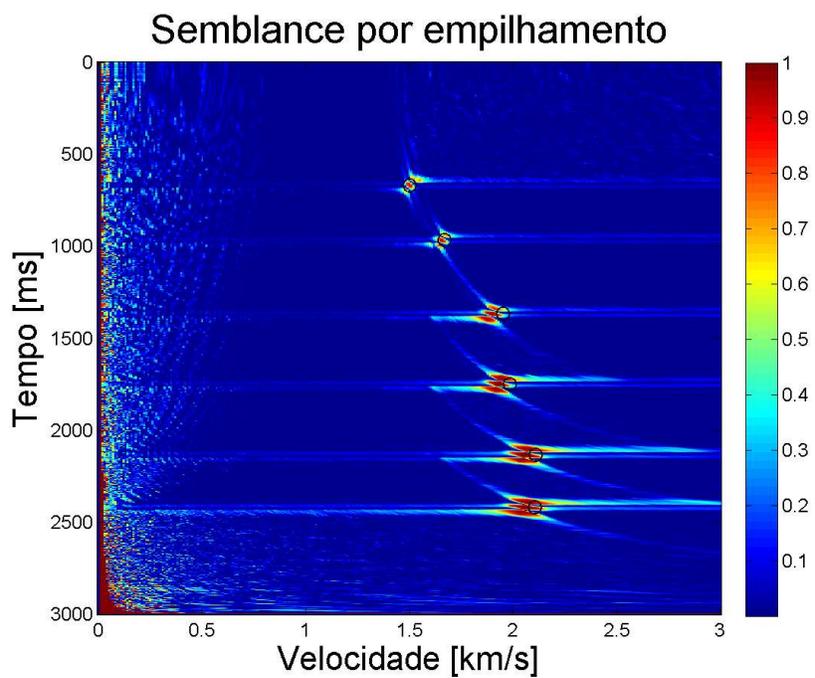


Figura C.13: *Semblance* “sem cortes” para  $SNR = 20$  do Modelo 2.

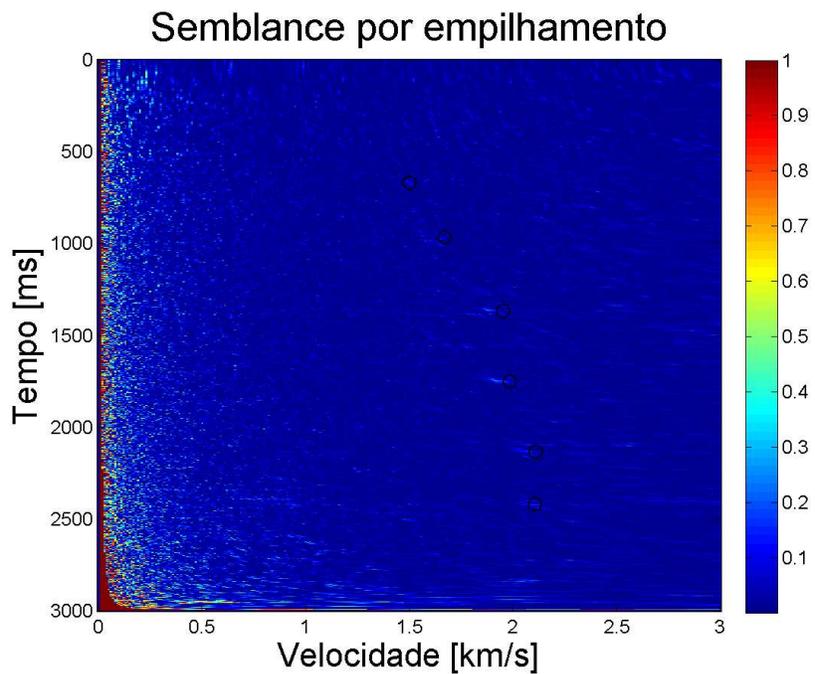
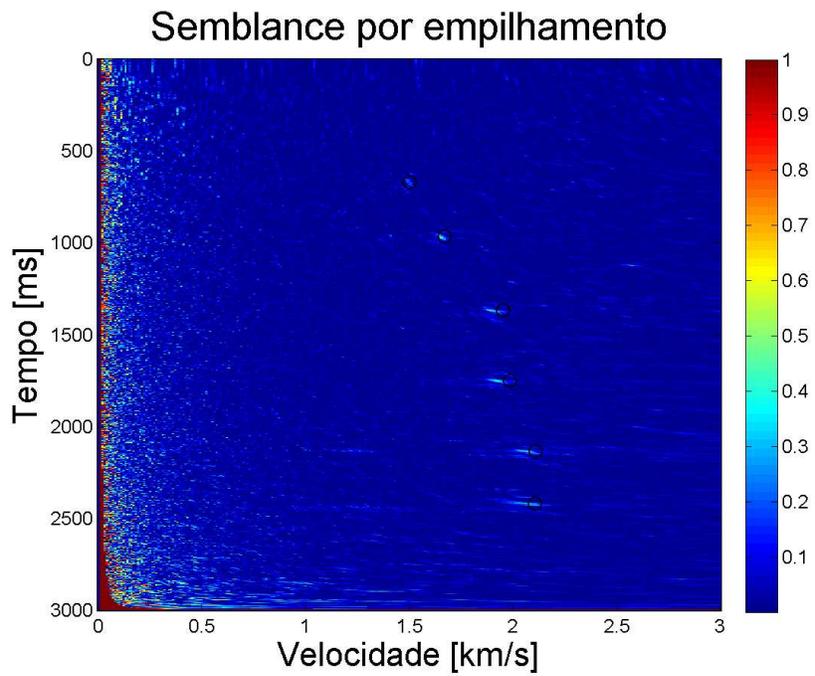


Figura C.14: *Semblance* por empilhamento “sem cortes” do Modelo 2. (a):  $SNR = 1$ . (b):  $SNR = 0.5$ .

---

# Referências bibliográficas

---

- Castle, R. J. (1994). A theory of normal moveout. *Geophysics*, 59(6):983–999.
- Claerbout, J. F. (1978). How to derive interval velocities using a pencil and straight edge. *Stanford Expl. Proj.*, 14.
- Clayton, R. W. and McMechan, G. A. (1981). Inversion of refraction data by wave field continuation. *Geophysics*, 46:860–868.
- Dix, C. H. (1955). Seismic velocities from surface measurements. *Geophysics*, 20(1):68–86.
- Dürbaum, H. (1954). Zur Bestimmung von Wellengeschwindigkeiten aus Reflexionsseismischen Messungen. *Geophysical Prospecting*, 2(2):151–167.
- Gonzalez-Serrano, A. and Claerbout, J. F. (1984). Wave-equation velocity analysis. *Geophysics*, 49(9):1432–1456.
- Green, C. H. (1938). Velocity determinations by means of reflection profiles. *Geophysics*, 3(4):295–305.
- Hubral, P. and Krey, T. (1980). Interval velocities from seismic reflection time measurements.
- Hubral, P., Schleicher, J., and Tygel, M. (1996). A unified approach to 3-D seismic reflection imaging – part I: Basic concepts. *Geophysics*, 61:742–758.
- Kim, Y. C. and Gonzalez, R. (1991). Migration velocity analysis with the Kirchhoff integral. *Geophysics*, 56(3):365–370.
- Levin, F. K. (1971). Apparent velocity from dipping interface reflections. *Geophysics*, 36(3):510–516.
- Liner, C. (1999). Concepts of normal and dip moveout. *Geophysics*, 64(5):1637–1647.
- Liu, Z. and Bleistein, N. (1995). Migration velocity analysis: Theory and an iterative algorithm. *Geophysics*, 60(1):142–153.
- Neidell, N. S. and Taner, M. T. (1971). Semblance and other coherency measures for multichannel data. *Geophysics*, 36(3):482–497.