



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA  
MECÂNICA E INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

JORGE HENRIQUE FACCIPIERI JUNIOR

# Método CRS interativo com controle semiautomático de aberturas

CAMPINAS

2016

JORGE HENRIQUE FACCIPIERI JUNIOR

# Método CRS interativo com controle semiautomático de aberturas

Tese de Doutorado apresentada à Faculdade de Engenharia Mecânica e Instituto de Geociências da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de Doutor em Ciências e Engenharia de Petróleo, na área de Reservatórios e Gestão.

Orientador: Prof. Dr. Martin Tygel

Este exemplar corresponde à versão final da Tese defendida pelo aluno Jorge Henrique Faccipieri Junior e orientada pelo Prof. Dr. Martin Tygel.

---

Prof. Dr. Martin Tygel.

Campinas

2016

**Agência(s) de fomento e nº(s) de processo(s):** Não se aplica.

Ficha catalográfica  
Universidade Estadual de Campinas  
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura  
Rose Meire da Silva - CRB 8/5974

F118m Faccipieri Junior, Jorge Henrique, 1983-  
Método CRS interativo com controle semiautomático de aberturas / Jorge Henrique Faccipieri Junior. – Campinas, SP : [s.n.], 2016.

Orientador: Martin Tygel.  
Tese (doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica e Instituto de Geociências.

1. Geofísica. 2. Método sísmico de reflexão. 3. Ondas sísmicas. I. Tygel, Martin, 1946-. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

**Título em outro idioma:** Interactive CRS method with semi-automatic aperture control

**Palavras-chave em inglês:**

Geophysics

Seismic reflection method

Seismic waves

**Área de concentração:** Reservatórios e Gestão

**Titulação:** Doutor em Ciências e Engenharia de Petróleo

**Banca examinadora:**

Martin Tygel [Orientador]

Edson Borin

Tiago Antonio Alves Coimbra

Armando Lopes Farias

Rodrigo Bloot

**Data de defesa:** 12-04-2016

**Programa de Pós-Graduação:** Ciências e Engenharia de Petróleo

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA  
E INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

TESE DE DOUTORADO

## MÉTODO CRS INTERATIVO COM CONTROLE SEMIAUTOMÁTICO DE ABERTURAS

Autor: Jorge Henrique Faccipieri Junior  
Orientador: Prof. Dr. Martin Tygel

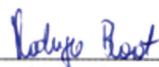
A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Tese:

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Martin Tygel  
IMECC/UNICAMP

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Edson Borin  
IC/UNICAMP

  
\_\_\_\_\_  
Dr. Tiago Antonio Alves Coimbra  
CEPETRO/UNICAMP

  
\_\_\_\_\_  
Dr. Armando Lopes Farias  
PETROBRAS

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Rodrigo Bloot  
UNILA

Campinas, 12 de abril de 2016.

*Dedico este trabalho aos meus pais, Jorge e Patrícia.*

“Wenn ist das Nunstück git und Slotermeyer? Ja! Beiherhund das Oder die  
Flipperwaldt gersput!”

*Ernest Scribber*

---

# Agradecimentos

---

Este trabalho não seria possível sem a ajuda de diversas pessoas às quais gostaria de expressar meus sinceros agradecimentos:

Aos meus pais, Jorge e Patrícia, por todo carinho, dedicação e suporte em todos esses anos. Muito obrigado!

A Natalia Gomes Gonçalves pela compreensão, por todos os finais de semana e noites em que fiquei ausente para me dedicar a esse trabalho. Sou muito grato por tudo que você fez e pelo que deixou de fazer para me ajudar com essa tese de doutorado.

Ao meu orientador Prof. Dr. Martin Tygel, pelas discussões científicas e por permitir que eu cursasse as disciplinas do doutorado em horário de trabalho. Além disso, gostaria também de agradecer pela oportunidade que me foi dada em 2010, no meu mestrado, sem a qual eu não teria alcançado tudo que alcancei. Muito obrigado por tudo.

Ao meu quase segundo orientador, Dr. Armando Lopes Farias, pelos conselhos e pelas intensas discussões, regadas a muito frango, durante minhas visitas à Petrobras. Muito obrigado por compartilhar sua vasta experiência e conhecimentos comigo.

Ao Prof. Dr. Edson Borin, pelos conselhos, apoio e por compartilhar seu conhecimentos.

Aos amigos do Grupo de Geofísica Aplicada: Alcides Goldoni, por estar sempre presente e disposto a resolver qualquer problema técnico que surgisse; Caian

Benedicto e Ian Liu Rodrigues, pelas discussões científicas e pela enorme ajuda, especialmente no que diz respeito a implementação de programas; Dany Rueda Serrano, pelas discussões, sugestões, dados processados e principalmente, por oferecer opiniões sinceras sobre cada resultado que lhe foi mostrado; João Renato D. Sacramento, pelos conselhos e por compartilhar responsabilidades na administração do laboratório; Tiago Antonio Alves Coimbra, pelas discussões científicas, pelos conselhos, por compartilhar ideias e pelas indicações de vídeos do YouTube. Mais uma vez, muito obrigado a todos! Vocês são excelentes no que fazem e esse trabalho nunca teria sido concluído sem as colaborações individuais de cada um de vocês.

Ao Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia - Geofísica do Petróleo (INCT-GP).

Ao consórcio *Wave Inversion Technology* (WIT).

À Petrobras.

---

# Resumo

---

FACCIPIERI, Jorge Henrique, *Método CRS iterativo com controle semiautomático de aberturas*. Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2016. 105p. Tese de Doutorado.

Técnicas de processamento sísmico baseadas em tempos de trânsito multiparamétricos, embora forneçam bons resultados de imageamento e inversão, necessitam de muito esforço computacional. Esse é o caso do método *Common Reflection Surface* (CRS) para o qual uma parte significativa da literatura é dedicada a estratégias e algoritmos, de modo que seus parâmetros sejam estimados de maneira ideal. No caso do CRS, seu tempo de trânsito depende de três e oito parâmetros, nas situações 2D e 3D, respectivamente. Além disso, supõe-se que a estimação desses parâmetros seja computada para cada amostra de uma seção ou volume *zero-offset* (ZO). Em muitos casos reais, o custo de estimação desses parâmetros torna-se impraticável. Nesse trabalho, uma abordagem de aplicação Interativa-Iterativa do método CRS é proposta, que consiste nos seguintes passos: (a) Seleção de pontos ao longo de eventos em uma seção empilhada CMP inicial; (b) Estimação global e exaustiva dos parâmetros CRS nesses pontos utilizando aberturas semiautomáticas na direção dos pontos médios; (c) Interpolação dos parâmetros CRS obtidos de modo a construir guias, preenchendo todas as amostras da seção ZO; (d) Refino global dos parâmetros CRS utilizando as guias obtidas como valores iniciais; (e) Empilhamento CRS com as guias refinadas pelo processo anterior; (f) Finalmente, esse processo é repetido adicionando, subtraindo ou editando-se os pontos selecionados até que o resultado esperado seja alcançado. Os resultados obtidos através dessa abordagem produziram seções empilhadas CRS de melhor qualidade e com reduzido custo computacional.

**Palavras-chave:** Geofísica, Método sísmico de reflexão, Ondas sísmicas.

---

# Abstract

---

FACCIPIERI, Jorge Henrique, *Interactive CRS method with semi-automatic aperture control*. Campinas, School of Mechanical Engineering, University of Campinas, 2016. 105p. PhD thesis.

Seismic processing techniques that are based on multi-parametric traveltimes, albeit providing good imaging and inversion results, carry the burden of much intensive and costly computation effort. That is the case of the Common-Reflection-Surface (CRS) method, for which a significant part of the literature is devoted to strategies and algorithms so that various parameters are estimated in an optimal way. In the case of CRS, the traveltimes depend on three and eight parameters in the 2D and 3D situations, respectively. Moreover, the parameter estimation is supposed to be computed at each sample of the zero-offset (ZO) stacked section or volume. In many real-data cases the computational costs are infeasible. In this work, a so-called Interactive-Iterative CRS approach is proposed, which consists of the following steps (a) User-selection at a few (picked) points, on an initial (given) CMP stacked section; (b) Global exhaustive evaluation of CRS parameters on these points using a semi-automatic aperture in midpoints; (c) Interpolation of the obtained CRS parameters to fill out all sample positions that comprise the ZO section or volume to be constructed; (d) Global refinement of CRS parameters using the previously obtained parameters as initial values; (e) Computation of the CRS stack with the refined parameters and finally (f) This process is repeated by adding, subtracting or editing points until the expected result is achieved. The results obtained with this approach were able to produce better stacked sections and reduce its the computational cost.

**Keywords:** Geophysics, Seismic reflection method, Seismic waves.

---

# Índice

---

Agradecimentos

Resumo

Abstract

Lista de Figuras

Lista de Tabelas

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>19</b>
1.1	Resumo dos Capítulos . . . . .	22
1.2	Lista de Publicações . . . . .	24
<b>2</b>	<b>Método CRS</b>	<b>26</b>
2.1	Superfície de tempo de trânsito CRS . . . . .	27
2.2	Aplicação do Método CRS . . . . .	30
2.2.1	Métodos de Estimação de Parâmetros . . . . .	32
2.2.2	Estratégias de Estimação de Parâmetros . . . . .	33
2.2.2.1	Estimação Global . . . . .	33
2.2.2.2	Estimação Local . . . . .	38
2.2.2.3	Estimação Híbrida . . . . .	45
<b>3</b>	<b>Aberturas de estimação e empilhamento</b>	<b>58</b>
3.1	Abertura na direção dos afastamentos . . . . .	58
3.2	Abertura na direção dos pontos médios . . . . .	60
3.2.1	Aberturas Semiautomáticas . . . . .	60
<b>4</b>	<b>Método CRS iterativo-iterativo</b>	<b>66</b>
4.1	Estratégia de estimação interativa-iterativa . . . . .	68
4.1.1	Interpolação de parâmetros CRS . . . . .	72

4.1.2 Exemplo de aplicação: Dado sintético . . . . .	75
<b>5 Resultados</b>	<b>79</b>
5.1 Dado Real: Tacutu . . . . .	79
<b>6 Conclusões</b>	<b>96</b>
<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>98</b>
<b>A Materiais Utilizados</b>	<b>102</b>
A.1 <i>Softwares</i> . . . . .	102
A.2 <i>Hardwares</i> . . . . .	103
A.3 Dados sísmicos . . . . .	103

---

# Lista de Figuras

---

2.1	Ilustração representando uma geometria de aquisição com uma fonte em $m-h$ , receptor em $m+h$ e ponto médio $m$ . Destacado em vermelho, temos o raio normal partindo de $m_0$ , refletindo no ponto NIP e voltando a $m_0$ . . . . .	28
2.2	Ilustração representando a superfície de tempo de trânsito CRS (destacada em verde) para um ponto $(m_0, t_0)$ em um dado sísmico de multicobertura 2D com aberturas $\delta^{(m)}$ e $\delta^{(h)}$ nas direções de pontos médios $(m)$ e meio-afastamentos $(h)$ , respectivamente. . . . .	30
2.3	Ilustração representando a propagação das ondas hipotéticas NIP, a esquerda, e Normal, a direita, ao longo do raio normal, destacado em vermelho, para um modelo 2D simples de camadas heterogêneas. . . . .	30
2.4	Fluxo simplificado de processamento CRS com a estratégia de estimação global de parâmetros. . . . .	34
2.5	Resultados obtidos utilizando a estratégia de estimação global de parâmetros CRS com aberturas fixas em meio afastamentos e pontos médios de 1300 m e 230 m, respectivamente. Os parâmetros $A$ e $C$ foram convertidos em ângulos de emergência e velocidades (Equação 2.5). . . . .	37
2.6	Fluxo simplificado de processamento CRS com a estratégia de estimação local de parâmetros. . . . .	39
2.7	Resultados obtidos utilizando a estratégia de estimação local (Etapa 3) para o parâmetro $C$ com abertura fixa em meio afastamentos de 1300 m. O parâmetro $C$ foi convertido em velocidades (Equação 2.5). . . . .	44
2.8	Resultados obtidos utilizando a estratégia de estimação local (Etapa 6) para o parâmetro $A$ com abertura fixa em pontos médios de 230 m. O parâmetro $A$ foi convertido em ângulos de emergência (Equação 2.5). . . . .	44
2.9	Resultados obtidos utilizando a estratégia de estimação local (Etapa 9) para o parâmetro $B$ . . . . .	45

2.10	Resultados finais (parâmetros refinados) obtidos utilizando a estratégia de estimação local (Etapa 13) de parâmetros CRS com aberturas fixas em meio afastamentos e pontos médios de 1300 m e 230 m, respectivamente. Os parâmetros CRS $A$ e $C$ foram convertidos em ângulos de emergência e velocidades (Equação 2.5). . . . .	46
2.11	Fluxo simplificado de processamento CRS com a estratégia de estimação híbrida de parâmetros. . . . .	48
2.12	Resultados obtidos utilizando a estratégia de estimação híbrida (Etapas 2 e 3) de parâmetros CRS com aberturas fixas em meio afastamentos e pontos médios de 1300 m e 230 m, respectivamente. Os parâmetros $A$ e $C$ foram convertidos em ângulos de emergência e velocidades (Equação 2.5). . . . .	51
2.13	Resultados obtidos na estratégia de estimação híbrida (Etapa 6) para o parâmetro $B$ com abertura fixa em pontos médios de 230 m. . . . .	52
2.14	Resultados finais (parâmetros refinados) obtidos utilizando a estratégia de estimação híbrida (Etapa 8) de parâmetros CRS com aberturas fixas em meio afastamentos e pontos médios de 1300 m e 230 m, respectivamente. Os parâmetros $A$ e $C$ foram convertidos em ângulos de emergência e velocidades (Equação 2.5). . . . .	53
2.15	Comparação entre os dados empilhados (finais) obtidos pelo método CMP (a) e pelo método CRS através das estratégias de estimação local (b), híbrida (c) e global (d). . . . .	55
2.16	Comparação entre os dados empilhados (finais) obtidos pelo método CMP (a) e pelo método CRS através das estratégias de estimação local (b), híbrida (c) e global (d) para outra região do mesmo dado sísmico. . . . .	56
3.1	Zona projetada de Fresnel para um evento de reflexão ZO com largura de pulso $w$ na posição $(m_0, t_0)$ . Note que a região delimitada pela abertura proposta, $\delta^{(m)}$ , se ajusta bem ao evento de reflexão seja qual for o valor do parâmetro $B$ . . . . .	63

3.2	Comparação entre três traços empilhados obtidos pelo método CRS e pelo método CRS para difrações para um dado real marinho utilizando a abertura proposta na Equação 3.7 com $\alpha = 1$ . . . . .	64
3.3	Comparação entre dados empilhados obtidos modificando-se apenas o fator de escala $\alpha$ (Equação 3.7) entre 0.0 e 2.5 para a estimação dos parâmetros CRS e para o empilhamento. Note que quanto maior o seu valor, mais suavizados ficam os eventos de reflexão, comprometendo os pequenos detalhes presentes na imagem. . . . .	65
4.1	Fluxo simplificado de processamento CRS pela abordagem interativa-iterativa com estimação global de parâmetros. . . . .	69
4.2	Ilustração representando a construção de uma guia de parâmetros $A$ . A curva interpolada entre pontos do mesmo horizonte é representada pela linha tracejada, e a interpolação entre horizontes, pelas retas pontilhadas (Triângulos de DeLauney). . . . .	75
4.3	Dado sintético: Dado empilhado CMP e guia do parâmetro $A$ construídos utilizando o dado pré-empilhado com pouco ruído. Tais resultados serão considerados apenas como referência. . . . .	76
4.4	Dado sintético: Dado empilhado CRS obtido na (a) primeira, (b) segunda, (c) terceira e (d) quarta iteração da estratégia de estimação interativa-iterativa. . . . .	77
4.5	Dado sintético: Refinamento da guia do parâmetro $A$ obtida na (a) primeira, (b) segunda, (c) terceira e (d) quarta iteração da estratégia de estimação interativa-iterativa. . . . .	78
5.1	Localização da linha sísmica 50-RL-90, destacada em azul, na Bacia do Tacutu. Adaptada de Silva e Porsani (2006). . . . .	80
5.2	Dado empilhado CMP considerado na seleção inicial de horizontes. Os pontos selecionados se encontram destacados pelos $\times$ 's e os pontos auxiliares interpolados com base nos valores do parâmetro $A$ destacados pelos $+$ 's pequenos. . . . .	81

5.3	Destaque da região em que a interpolação de horizontes não apresentou resultados satisfatórios. Para corrigir essa situação, um novo ponto foi selecionado e o processo de interpolação refeito. As guias obtidas para o parâmetro $A$ em ambos os casos também são apresentadas. . . . .	83
5.4	Guias interpoladas dos parâmetros $A$ e $B$ obtidas na primeira iteração de processamento do CRS iterativo-iterativo. . . . .	84
5.5	Dado empilhado CRS obtido na primeira iteração do processamento CRS iterativo-iterativo, considerando guias em todos os parâmetros CRS. . . . .	85
5.6	Seleção de novos horizontes no dado empilhado CRS da Figura 5.5. Os novos pontos selecionados se encontram destacados, em verde, pelos $\times$ 's e os pontos auxiliares interpolados com base nos valores do parâmetro $A$ destacados pelos $+$ 's pequenos. Em preto, temos os pontos selecionados na iteração anterior. . . . .	86
5.7	Região 1: Comparação entre os dados empilhados (finais) obtidos pelo (a) método CMP e pelo método CRS através das estratégias de (b) estimacão global, (c) primeira iteração e (d) segunda iteração do CRS iterativo-iterativo. . . . .	87
5.8	Região 1: (a) Guia inicial para o parâmetro $C$ obtido através de análise de velocidades convencional. Comparação entre os parâmetros $C$ obtidos pelo método CRS através das estratégias de (b) estimacão global, (c) primeira iteração e (d) segunda iteração do CRS iterativo-iterativo. . . . .	88
5.9	Região 1: (a) Guia inicial para o parâmetro $A$ obtido na primeira iteração do CRS iterativo-iterativo. Comparação entre os parâmetros $A$ obtidos pelo método CRS através das estratégias de (b) estimacão global, (c) primeira iteração e (d) segunda iteração do CRS iterativo-iterativo. . . . .	89

5.10	Região 1: (a) Guia inicial para o parâmetro $B$ obtido na primeira iteração do CRS iterativo-iterativo. Comparação entre os parâmetros $B$ obtidos pelo método CRS através das estratégias de (b) estimação global, (c) primeira iteração e (d) segunda iteração do CRS iterativo-iterativo. . . . .	90
5.11	Região 2: Comparação entre os dados empilhados (finais) obtidos pelo (a) método CMP e pelo método CRS através das estratégias de (b) estimação global, (c) primeira iteração e (d) segunda iteração do CRS iterativo-iterativo. . . . .	91
5.12	Região 2: (a) Guia inicial para o parâmetro $C$ obtido através de análise de velocidades convencional. Comparação entre os parâmetros $C$ obtidos pelo método CRS através das estratégias de (b) estimação global, (c) primeira iteração e (d) segunda iteração do CRS iterativo-iterativo.	92
5.13	Região 2: (a) Guia inicial para o parâmetro $A$ obtido na primeira iteração do CRS iterativo-iterativo. Comparação entre os parâmetros $A$ obtidos pelo método CRS através das estratégias de (b) estimação global, (c) primeira iteração e (d) segunda iteração do CRS iterativo-iterativo. . . . .	93
5.14	Região 2: (a) Guia inicial para o parâmetro $B$ obtido na primeira iteração do CRS iterativo-iterativo. Comparação entre os parâmetros $B$ obtidos pelo método CRS através das estratégias de (b) estimação global, (c) primeira iteração e (d) segunda iteração do CRS iterativo-iterativo. . . . .	94

---

# Lista de Tabelas

---

2.1	Comparação dos parâmetros de execução do método CRS utilizando as estratégias global, híbrida e local para os exemplos apresentados na Seção 2.2.2. Em todos os experimentos, o mesmo <i>hardware</i> (apresentado no Apêndice A) e os mesmos conjuntos de parâmetros de abertura foram utilizados. . . . .	57
5.1	Dado Tacutu: Parâmetros de aquisição do dado sísmico de multico- bertura. . . . .	79
5.2	Comparação dos parâmetros de execução do método CRS utilizando as estratégias global e interativa-iterativa para os exemplos apresentados no Capítulo 5. Em todos os experimentos, o mesmo <i>hardware</i> (apresentado no Apêndice A) e os mesmos conjuntos de parâmetros de abertura foram utilizados. . . . .	95
A.1	Dado sintético Sol Nascente 2D: Parâmetros de aquisição do dado sísmico de multico- bertura. . . . .	104
A.2	Dado Tacutu: Parâmetros de aquisição do dado sísmico de multico- bertura. . . . .	104
A.3	Dado Jequitinhonha: Parâmetros de aquisição do dado de multicober- tura. . . . .	105

---

# 1 Introdução

---

No processamento de dados sísmicos, o empilhamento é provavelmente a ferramenta mais utilizada, por uma razão simples: o empilhamento se beneficia da redundância presente nos dados sísmicos de multicobertura para obter imagens de maior relação sinal-ruído que o dado original. Os operadores de empilhamento são desenvolvidos de modo a realçar os eventos de interesse por meio de interferência construtiva e atenuar ruídos (ruído aleatório, ruído coerente ou mesmo eventos indesejáveis) através da interferência destrutiva. O uso mais difundido de empilhamento em processamento de dados sísmicos está incorporado no método *Common Midpoint* (CMP) (Mayne, 1962). De acordo com Yilmaz (2001), o empilhamento CMP, a deconvolução e a migração são os principais componentes do processamento de dados sísmicos.

O método CMP tem como dado de entrada um dado sísmico de multicobertura organizado em conjuntos de traços chamados de famílias CMP (ou CMP *gather*s). Cada uma dessas famílias contém traços de pares fonte-receptor simetricamente distantes de um ponto central ou ponto médio (também chamado simplesmente de CMP). O índice ou a posição desse CMP é quem define essa família de traços. Como produto final da aplicação do método CMP, cada família CMP é empilhada e produz um único traço na posição do ponto médio. Além disso, como parte desse processo de empilhamento, uma velocidade sísmica, conhecida como velocidade *normal-moveout* (NMO), é atribuída a cada amostra de tempo desse traço empilhado. O conjunto de traços obtido dessa forma é interpretado como um dado de afastamento nulo, simulado, que representa a situação em que a aquisição do dado era composta de uma fonte e um receptor em cada posição CMP. Esse dado empilhado, assim como o campo de velocidades NMO, constitui a primeira imagem do dado sísmico de multicobertura.

O método CMP utiliza o operador de empilhamento NMO (Taner e Koehler, 1969; Hubral e Krey, 1980) para aproximar os tempos de trânsito de eventos de reflexão presentes em uma família CMP. Como mencionado anteriormente, esse operador de empilhamento depende das velocidades NMO, que são selecionadas segundo critérios

---

de coerência, geralmente *Seimblance*, (Neidell e Taner, 1971) para eventos presentes no dado multicobertura. Além do tempo de trânsito NMO, existem outras expressões destinadas para essa mesma finalidade, porém adequadas para diferentes situações. Para mais informações sobre essas expressões de tempo de trânsito e suas aplicações, ver Tygel e Santos (2007).

Apesar de sua popularidade, o tempo de trânsito NMO possui a desvantagem de restringir-se a apenas uma família CMP para construir um traço empilhado, que representa uma pequena fração da redundância disponível em um dado multicobertura. No final dos anos 90 (Hubral, 1999; Yilmaz, 1999), um passo decisivo para eliminar essa restrição foi dado com a introdução de duas novas abordagens, a saber: o método *Common Reflection Surface* (CRS) (Mann et al., 1999; Höcht et al., 1999; Müller, 1999) e o *Multifocus* (MF) (Gelchinsky et al., 1999a,b; Landa et al., 1999). Ambas as abordagens permitem que uma vizinhança de famílias CMP seja considerada na construção de cada traço empilhado, fazendo melhor uso da redundância presente no dado de multicobertura ao custo de dependerem de um maior número de parâmetros para realizar o empilhamento dos dados. Nesse estudo, apenas o método CRS será considerado.

Diferentemente do que ocorre no método CMP, em que a velocidade NMO é selecionada por um usuário, no método CRS os parâmetros são estimados automaticamente para cada amostra de tempo através do cálculo da *Seimblance*. Por esse motivo, o método CRS é frequentemente considerado *data-driven*, devido à forte presença de processos automáticos de estimação de seus parâmetros. Essa característica faz com que o custo computacional de aplicação desse método seja muito elevado. De modo a contornar esse alto custo computacional, diferentes estratégias foram desenvolvidas para explorar certas características do tempo de trânsito CRS (Müller et al., 1998; Müller, 1999; Garabito et al., 2001) que reduzem o número de estimações simultâneas. Métodos de estimação de parâmetros de menor custo computacional e diferentes tecnologias também foram estudados e empregados na aplicação do método CRS (Marchetti et al., 2010; Heilmann et al., 2014; Barros et al., 2015). Além do alto custo computacional associado à estimação de um maior número de parâmetros, esse custo também é influenciado pelos tamanhos das aberturas de estimação e de em-

---

pillamento, os quais também impactam na qualidade final do empilhamento CRS. Essas aberturas são de grande importância, pois determinam a região do dado de multicoertura que será considerada na construção de cada amostra do dado empilhado CRS. As principais abordagens utilizadas na aplicação do método CRS serão descritas em detalhes e discutidas no Capítulo 2.

Este trabalho tem como proposta se opor, ao menos parcialmente, à abordagem de processamento CRS *data-driven*. Ao considerar processos automáticos que se utilizam apenas de medidas de coerência para estimar parâmetros, corre-se o risco de obter parâmetros sem significado geológico, ou que não possuem relação com seus vizinhos ou ainda que se orientam na direção de ruídos coerentes. Dados de multicoertura empilhados com parâmetros CRS contaminados por esses valores frequentemente apresentam ruídos de alta frequência, eventos descontínuos e eventos artificiais (também conhecidos como “minhocas”).

Neste trabalho, propõe-se uma abordagem interativa e iterativa de aplicação do método CRS que consiste dos seguintes passos: (1) Um intérprete seleciona pontos sobre eventos de reflexão visíveis em um dado empilhado inicial (podendo este ser um empilhado CMP ou CRS), os quais terão seus parâmetros CRS estimados de maneira global e exaustiva. Isto é, para um dado ponto, todos os parâmetros CRS serão estimados simultaneamente, varrendo completamente os intervalos de estimação pré-determinados para cada parâmetro; (2) Guias de parâmetros serão construídas com base nos valores estimados nos pontos selecionados através de processos de interpolação e extrapolação. O objetivo dessas guias é capturar a tendência de variação desses parâmetros e evitar que o processo de estimação seguinte selecione um valor muito diferente da guia; (3) Refinamento global de parâmetros CRS utilizando as guias obtidas como valores iniciais; (4) Empilhamento CRS com os parâmetros refinados; (5) Esse processo é repetido adicionando, subtraindo ou editando os pontos selecionados até que o resultado desejado seja alcançado ou a diferença entre cada repetição (ou iteração) seja desprezível.

Além da estratégia interativa-iterativa, são propostas aberturas semiautomáticas em pontos médios, de estimação e de empilhamento de parâmetros, construídas com base na zona projetada de Fresnel. Essa etapa tem como objetivo diminuir o número

---

de testes necessários para encontrar aberturas adequadas e evitar que o empilhado CRS suavize os eventos de reflexão.

Um fluxo de trabalho envolvendo todas essas propostas foi desenvolvido, discutido e aplicado a um dado real terrestre, o qual apresentou ganhos significativos em qualidade na seção empilhada CRS. Os parâmetros CRS obtidos por esse fluxo apresentaram-se mais estáveis e confiáveis que os obtidos convencionalmente, utilizando-se estratégias que estimam todos os parâmetros CRS simultaneamente. Ademais, no exemplo apresentado, foi alcançada uma redução de cerca de 75% do custo computacional em relação aos fluxos convencionais de aplicação do método CRS.

## 1.1 Resumo dos Capítulos

Além desta introdução, são apresentados os seguintes capítulos:

### Capítulo 2 - Método CRS

No Capítulo 2, é apresentado o método de empilhamento multiparamétrico de dados sísmicos *Common Reflection Surface* (CRS). O método CRS pode ser considerado uma generalização do método de empilhamento CMP, pois torna possível a utilização de mais de um CMP na construção do dado empilhado. Para tanto, o método CRS necessita de um número maior de parâmetros (três no caso de dados 2D e oito para 3D). O elevado custo associado à estimação desses parâmetros levou ao desenvolvimento de diversas estratégias de modo a viabilizar sua aplicação. Tais estratégias e os principais aspectos práticos de aplicação desse método serão apresentados e discutidos nesse Capítulo.

### Capítulo 3 - Aberturas de estimação e empilhamento

No Capítulo 3 as aberturas necessárias à aplicação do método CRS são discutidas. Essas aberturas definem a região em que a superfície de tempo de trânsito CRS será considerada, tanto para estimar seus parâmetros quanto para realizar o empilhamento

---

dos dados. Usualmente, essas aberturas são definidas por um intérprete, através de testes durante o processamento do dado sísmico. Uma proposta para automatizar a escolha dessas aberturas é apresentada nesse Capítulo. Além disso, a influência das aberturas nos valores estimados para os parâmetros CRS e, especialmente, na qualidade do resultado final do empilhamento CRS será discutida.

## Capítulo 4 - Método CRS interativo-iterativo

No Capítulo 4 é proposta uma nova estratégia para aplicação do método CRS. Diferente das estratégias encontradas na literatura, que consideram abordagens do tipo *data-driven* na estimação de parâmetros CRS, a estratégia proposta permite um maior controle por parte do usuário sobre os intervalos de estimação desses parâmetros. Guias de parâmetros, que capturam a tendência local de variação dos parâmetros CRS, são construídas através da seleção manual de pontos (ou *pickings*) sobre eventos de reflexão em um dado empilhado (CMP ou CRS). Essas guias são refinadas através de um processo iterativo até que o resultado esperado seja alcançado.

## Capítulo 5 - Resultados

No Capítulo 5, são apresentados resultados, comparações e observações feitos durante a aplicação dos métodos e estratégias desenvolvidos nos Capítulos 3 e 4 em um dado real terrestre da Bacia da Tacutu.

## Capítulo 6 - Conclusões

No Capítulo 6, são expostas as conclusões, as principais contribuições desse trabalho e propostos futuros temas de pesquisa relacionados ao processamento de dados sísmicos pelo método CRS e aos métodos propostos nesse trabalho.

## Apêndice A - Materiais utilizados

No Apêndice A são listados todos os *softwares*, *hardwares* e dados utilizados utilizados na produção dessa tese de doutorado.

---

## 1.2 Lista de Publicações

No período de 2014 a 2016, em que essa tese de doutorado foi elaborada, foram publicados os seguintes trabalhos:

1. FACCIPIERI, J. H.; COIMBRA, T. A.; GELIUS, L.-J.; TYGEL, M.. Stacking apertures and estimation strategies for reflection and diffraction enhancement, **Geophysics**, vol. 81, no. 4, 2016. (Aceito para publicação)
2. COIMBRA, T. A.; FACCIPIERI, J. H.; RUEDA, D. S.; TYGEL, M.. Common-reflection-point time migration. **Studia Geophysica et Geodaetica**, v. 60, 2016.
3. FACCIPIERI, J. H.; COIMBRA, T. A.; GELIUS, L. -J.; TYGEL, M.. Bi-parametric traveltimes and stacking apertures for reflection and diffraction enhancement. **14th International Congress of the Brazilian Geophysical Society EXPOGEF**, p. 1355, 2015.
4. COIMBRA, T. A.; FACCIPIERI, J. H.; GELIUS, L.-J. ; TYGEL, M. . Enhancement of stacked sections using ZO CRS parameters. **14th International Congress of the Brazilian Geophysical Society EXPOGEF**, p.1251, 2015.
5. COIMBRA, T. A.; FACCIPIERI, J. H.; TYGEL, M.. Common-reflection-point (CRP) time migration. **Workshop meeting active and passive seismics in laterally inhomogeneous media**, 2015.
6. COIMBRA, T. A.; FACCIPIERI, J. H.; TYGEL, M.. Time-migration in the Common-Reflection-Point (CRP) domain. **14th International Congress of the Brazilian Geophysical Society EXPOGEF**, p. 1228, 2015.
7. COIMBRA, T. A.; FACCIPIERI, J. H.; GELIUS, L.J.; TYGEL, M.. Enhancement of stacked sections using ZO CRS parameters. **Wave Inversion Technology (WIT) Annual Meeting**, 2015.

- 
8. BORIN, E.; DA SILVA, H. C.; FACCIPIERI, J. H.; TYGEL, M.. Accelerating semblance computations on heterogeneous devices using OpenCL. **Wave Inversion Technology (WIT) Annual Meeting**, 2015.
  9. COIMBRA, T.A.; FACCIPIERI, J. H.; TYGEL, M.. Time-to-depth conversion using modeling rays. **Wave Inversion Technology (WIT) Annual Meeting**, 2015.
  10. FACCIPIERI, J. H.; COIMBRA, T.A.; RUEDA, D.; RODRIGUES, I. L.; FARIAS, A. L.; TYGEL, M.. Surgical CRS Stacking. **Wave Inversion Technology (WIT) Annual Meeting**, 2015.
  11. FACCIPIERI, J. H.; COIMBRA, T. A.; TYGEL, M.; GELIUS, L.J.. Common-Reflection-Surface (CRS) Stacking with Diffraction Moveouts of Varying Aperture. **76th EAGE Conference and Exhibition Workshops**, 2014.
  12. FACCIPIERI, J. H.; COIMBRA, T. A.; GELIUS, L.J.; TYGEL, M.. A CRS-based Heterogeneity Attribute. **76th EAGE Conference and Exhibition Workshops**, 2014.
  13. FACCIPIERI, J. H.; COIMBRA, T. A.; GELIUS, L.J.; TYGEL, M.. Stacking apertures and estimation strategies for reflection and diffraction enhancement. **Wave Inversion Technology (WIT) Annual Meeting**, 2014.
  14. COIMBRA, T. A.; FACCIPIERI, J. H.; TYGEL, M.. CRP time migration. **Wave Inversion Technology (WIT) Annual Meeting**, 2014.

---

## 2 Método CRS

---

Como mencionado no Capítulo 1, o método CMP (Mayne, 1962) é amplamente utilizado no processamento de dados sísmicos, fornecendo a primeira imagem interpretável da subsuperfície<sup>1</sup>, o empilhado CMP. Para a construção do dado empilhado CMP, o tempo de trânsito NMO (dependente apenas da velocidade NMO) é utilizado para aproximar os eventos de reflexão presentes em uma única família CMP. Porém, essa restrição limita a quantidade de informações (traços) a serem consideradas na construção do dado empilhado CMP.

Supondo que as estruturas geológicas da subsuperfície apresentam certa continuidade, é possível explorar essa característica e considerar a vizinhança de um CMP, ou seja, outros CMPs, para construir o dado empilhado. O método CRS (Mann et al., 1999; Höcht et al., 1999; Müller, 1999), é capaz de utilizar essa continuidade lateral na construção dos traços empilhados pois sua equação de tempo de trânsito é obtida através de uma expansão em polinômio de Taylor até segunda ordem para o tempo de trânsito relativo a um refletor desconhecido, considerando o meio afastamento,  $h$ , e o deslocamento em pontos médios,  $m - m_0$ , que é a diferença entre o ponto médio de um par fonte-receptor,  $m$ , e do ponto central,  $m_0$ . Nesse processo, a equação de tempo trânsito obtida depende de mais parâmetros que a do método CMP. Nesse capítulo, assim como nos que se seguem, apenas o caso 2D será considerado.

Por utilizar mais traços, ou seja, mais informações na construção de cada traço empilhado, o método CRS pode fornecer eventos com melhor continuidade e relação sinal-ruído em comparação com os obtidos pelo método CMP. Além da capacidade de melhorar a qualidade do dado empilhado obtido, o método CRS também fornece mais parâmetros ou atributos geológicos sobre os eventos presentes no dado, a saber: (1) Velocidade NMO, assim como no método CMP; (2) Ângulo de emergência do raio

---

<sup>1</sup>O dado empilhado não representa a subsuperfície de maneira precisa, uma vez que efeitos de propagação de ondas não foram removidos do dado, sendo este o papel dos processos de migração em tempo e profundidade. No entanto, essa primeira imagem fornece informações de extrema relevância que ditam os passos de processamento futuros. No caso do método CRS, além de fornecer imagens de qualidade superior ao método convencional, ele também fornece mais informações, na forma de parâmetros CRS, que podem ser relacionados a características físicas da subsuperfície.

normal e (3) Curvatura desses eventos de reflexão. Tais informações adicionais permitem avaliações mais refinadas da geologia daquela região e também permitem que outras técnicas de processamento possam ser aplicadas ao dado, como a tomografia NIP (do inglês, *Normal Incidence Point*) (Duveneck, 2004), cálculo de espalhamento geométrico (Hubral, 1983), conversão tempo-profundidade (Farias, 2008; Coimbra et al., 2015) etc.

No que se segue, a equação da superfície de tempo de trânsito CRS será deduzida e os principais elementos para a efetiva aplicação desse método serão discutidos, são eles: (1) A estratégia de estimação de parâmetros CRS, que definem os domínios considerados na estimação. Estes domínios podem compreender todo o volume de dados disponível ou subconjuntos do mesmo; (2) O método de estimação, que define como os parâmetros CRS serão estimados naquele domínio. Nesse caso, há duas possibilidades: buscas exaustivas ou buscas utilizando heurísticas; (3) As aberturas de estimação e empilhamento, que delimitam as regiões consideradas para a estimação de parâmetros e o empilhamento CRS e (4) Os intervalos de estimação, que definem os espaços de busca relevantes para cada parâmetro CRS.

## 2.1 Superfície de tempo de trânsito CRS

A equação da superfície de tempo de trânsito CRS será obtida através de uma expansão em polinômio de Taylor com derivadas até segunda ordem. O polinômio de Taylor é capaz de aproximar uma função em uma determinada vizinhança de um ponto dadas as derivadas dessa função neste mesmo ponto. Nesse caso, a função a ser aproximada é o tempo de trânsito referente a um par fonte-receptor com ponto médio  $m$  na vizinhança do ponto central,  $m_0$ . Para isso será necessário conhecer seu tempo de afastamento nulo (ou *zero-offset* (ZO)) e suas derivadas de primeira e segunda ordem no referido ponto.

A Figura 2.1 ilustra o tempo de trânsito referente a um par fonte-receptor com ponto médio  $m$  e meio afastamento  $h$  na vizinhança de  $m_0$ . Do ponto central  $m_0$ , parte um raio normal que se propaga até incidir perpendicularmente em um refletor e retorna à superfície pelo mesmo caminho até o mesmo ponto  $m_0$ .

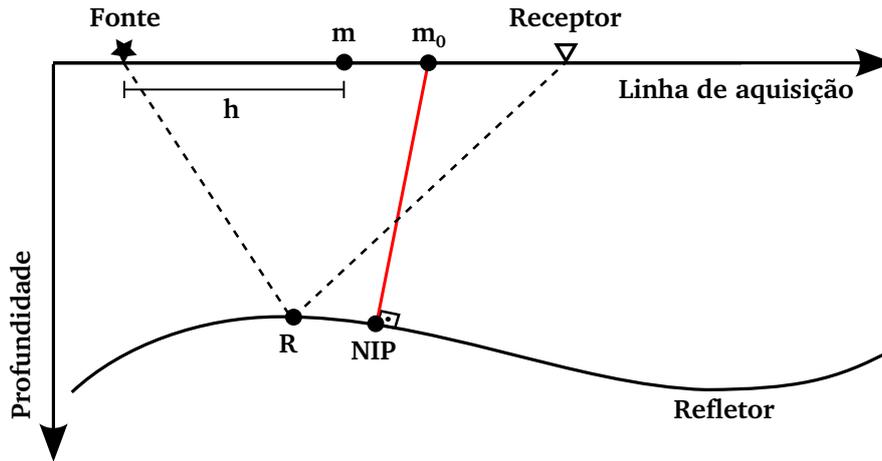


Figura 2.1: Ilustração representando uma geometria de aquisição com uma fonte em  $m - h$ , receptor em  $m + h$  e ponto médio  $m$ . Destacado em vermelho, temos o raio normal partindo de  $m_0$ , refletindo no ponto NIP e voltando a  $m_0$ .

A expansão em polinômio de Taylor até segunda ordem do referido tempo de trânsito resulta na equação

$$t(m, h) \approx t(m_0, 0) + \mathcal{A}(m - m_0) + \mathcal{D}h + \frac{1}{2}[\mathcal{B}(m - m_0)^2 + 2\mathcal{E}(m - m_0)h + \mathcal{C}h^2] \quad (2.1)$$

onde

$$\mathcal{A} = \left. \frac{\partial t}{\partial m} \right|_{(m_0, 0)}; \quad \mathcal{B} = \left. \frac{\partial^2 t}{\partial m^2} \right|_{(m_0, 0)}; \quad \mathcal{C} = \left. \frac{\partial^2 t}{\partial h^2} \right|_{(m_0, 0)}; \quad \mathcal{D} = \left. \frac{\partial t}{\partial h} \right|_{(m_0, 0)} \quad \text{e} \quad \mathcal{E} = \left. \frac{\partial^2 t}{\partial h \partial m} \right|_{(m_0, 0)}.$$

Considerando apenas o caso acústico e um meio homogêneo, essa equação de tempo de trânsito deve satisfazer o *Princípio da Reciprocidade*. Tal princípio garante que fontes e receptores podem ser trocados de posição sem que haja alteração no resultado observado. Para que isso ocorra, a função obtida deve ser par com relação aos afastamentos (variável  $h$ ). Isso implica em  $\mathcal{D} = \mathcal{E} = 0$  na Equação 2.1, que se reduz a

$$t(m, h) \approx t(m_0, 0) + \mathcal{A}(m - m_0) + \frac{1}{2}[\mathcal{B}(m - m_0)^2 + \mathcal{C}h^2]. \quad (2.2)$$

Essa expressão é conhecida como tempo de trânsito parabólico. Para obter o tempo de trânsito hiperbólico, basta elevar ao quadrado ambos os lados da Equação 2.2 e

preservar apenas os termos até segunda ordem em  $(m - m_0)$  e  $h$ , que resulta em

$$t^2(m, h) \approx [t(m_0, 0) + \mathcal{A}(m - m_0)]^2 + t(m_0, 0)[\mathcal{B}(m - m_0)^2 + \mathcal{C}h^2], \quad (2.3)$$

Por simplicidade, a Equação 2.3 será reescrita como

$$t_{CRS}^2(m, h) = [t_0 + A(m - m_0)]^2 + B(m - m_0)^2 + Ch^2, \quad (2.4)$$

onde

$$t_0 = t(m_0, 0), \quad A = \mathcal{A}, \quad B = t_0\mathcal{B}, \quad \text{e} \quad C = t_0\mathcal{C}. \quad (2.5)$$

A Figura 2.2 ilustra a superfície de tempo de trânsito CRS definida pela Equação 2.4 para um ponto  $(m_0, t_0)$  de um dado adquirido ao longo de uma linha (caso 2D). As derivadas em pontos médios e meio afastamentos, dadas pelos coeficientes  $A$ ,  $B$  e  $C$ , também podem ser expressas em relação a atributos físicos referentes a duas frentes de onda hipotéticas emergindo na superfície de aquisição na posição  $m_0$  (Hubral, 1983; Tygel et al., 1997), a saber

$$A = 2\frac{\text{sen}\beta}{v_0}, \quad B = 2t_0\frac{\text{cos}^2\beta}{v_0}K_N \quad \text{e} \quad C = 2t_0\frac{\text{cos}^2\beta}{v_0}K_{NIP} = \frac{4}{v_{NMO}^2}. \quad (2.6)$$

O coeficiente  $A$  pode ser entendido como o dobro da vagarosidade do raio normal emergente em  $m_0$ , o qual está relacionado ao seu ângulo de emergência  $\beta$  e à velocidade na vizinhança de  $m_0$ ,  $v_0$ . O coeficiente  $B$  está relacionado à curvatura ( $K_N = 1/R_N$ ) de uma frente de onda emergindo em  $m_0$  proveniente de uma vizinhança em torno do ponto NIP, propagada como um refletor explosivo (Loewenthal et al., 1976) até a superfície, ver Figura 2.3 (direita). Finalmente, o coeficiente  $C$  está relacionado à curvatura ( $K_{NIP} = 1/R_{NIP}$ ) de uma frente de onda emergindo em  $m_0$  proveniente de uma fonte pontual no ponto de incidência do raio normal, ou NIP, como se pode observar na Figura 2.3 (esquerda). Além disso, o coeficiente  $C$  também pode ser relacionado à velocidade NMO utilizada no método CMP. Essa relação pode ser facilmente verificada considerando o caso em que  $m = m_0$  na Equação 2.4, que resulta na equação de tempo de trânsito NMO.

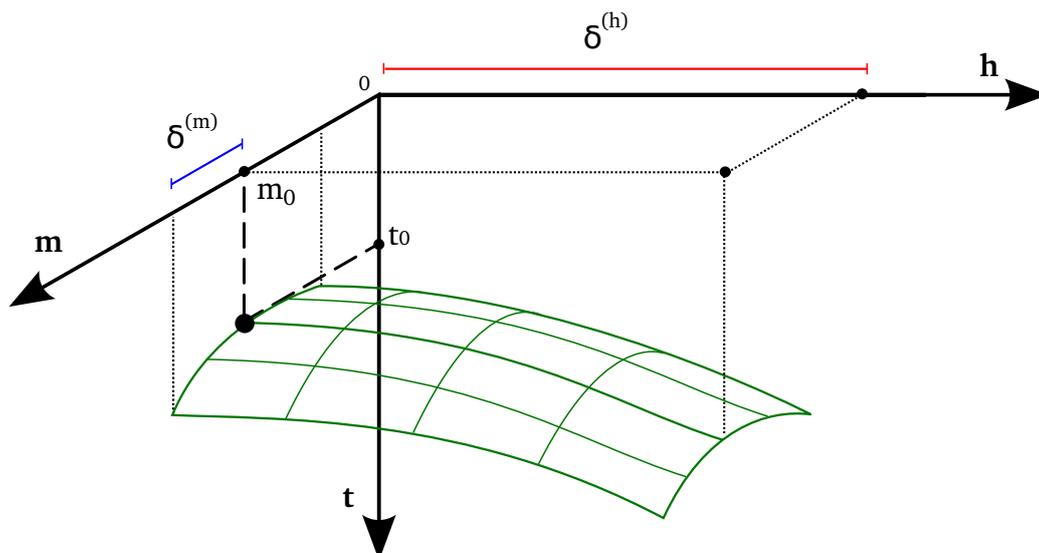


Figura 2.2: Ilustração representando a superfície de tempo de trânsito CRS (destacada em verde) para um ponto  $(m_0, t_0)$  em um dado sísmico de multicobertura 2D com aberturas  $\delta^{(m)}$  e  $\delta^{(h)}$  nas direções de pontos médios ( $m$ ) e meio-afastamentos ( $h$ ), respectivamente.

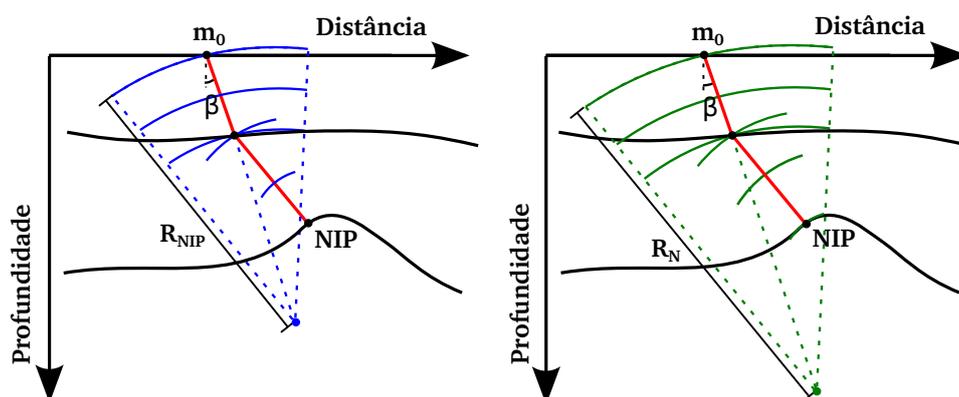


Figura 2.3: Ilustração representando a propagação das ondas hipotéticas NIP, a esquerda, e Normal, a direita, ao longo do raio normal, destacado em vermelho, para um modelo 2D simples de camadas heterogêneas.

## 2.2 Aplicação do Método CRS

Para cada ponto  $(m_0, t_0)$  do dado sísmico ZO (do inglês, *zero-offset*), os três parâmetros CRS devem ser estimados com base em análises de coerência, geralmente Semblance (Neidell e Taner, 1971), envolvendo traços pertencentes a uma abertura de estimação. Tais aberturas serão discutidas em detalhes no Capítulo 3. Ao final desse processo o trio de parâmetros CRS de maior coerência é atribuído à referida

amostra. Para isso, intervalos de estimação são definidos por um intérprete para cada parâmetro CRS dependendo de características do dado sísmico em questão. Essas informações podem ser levantadas a partir de testes, de dados obtidos em processamentos anteriores, de dados de poços e de informações geológicas da bacia. É importante determinar esses intervalos de modo que estes não se desviem muito dos valores “reais”, assim reduzindo a possibilidade de que parâmetros com valores espúrios sejam estimados.

No método CMP essa etapa é realizada manualmente, por um intérprete, que estima a melhor velocidade NMO para um determinado evento com base em critérios como: valor de *Semblance*, focalização do evento empilhado e horizontalização do evento na família CMP entre outros (Taner e Koehler, 1969). Esse procedimento, chamado análise de velocidades, se encontra muito bem estabelecido e faz parte das práticas usuais de processamento de dados sísmicos de multicobertura. Por se tratar da estimação de um único parâmetro, a velocidade NMO, o intérprete tem grande controle sobre o modelo de velocidades obtido, pois apenas os eventos de interesse são consideradas na construção do modelo de velocidade NMO.

No método CRS, tais procedimentos manuais tornam-se impraticáveis, uma vez que são necessárias estimações simultâneas de três parâmetros. Isso significa que para um único ponto de um evento de reflexão, considerados intervalos de estimação para os parâmetros  $A$ ,  $B$  e  $C$ , um intérprete teria que identificar o máximo de coerência em um cubo. Os três eixos desse cubo representariam os intervalos de estimação de cada parâmetro CRS, onde constaria o valor de *semblance* computado de cada trio de parâmetros, que definem um ponto no interior desse cubo. Para contornar essa dificuldade, o papel do intérprete de avaliar e determinar os melhores parâmetros CRS é transferido para processos automáticos de estimação que avaliam todos os pontos do dado. Como consequência dessa automatização, eleva-se drasticamente o custo computacional de aplicação do método CRS, em comparação com o método CMP.

De modo a viabilizar a aplicação do método CRS, mesmo consideradas tais estimações automáticas, três abordagens podem ser consideradas: (1) Utilizar métodos de estimação de menor custo computacional; (2) Explorar subconjuntos do dado

---

sísmico para reduzir a quantidade de parâmetros estimados simultaneamente e (3) Combinações dos dois casos anteriores. A seguir, tais abordagens serão discutidas em detalhes.

### 2.2.1 Métodos de Estimação de Parâmetros

Nesse trabalho, o termo método de estimação se refere ao processo pelo qual o espaço de estimação é explorado de modo a determinar o melhor conjunto de parâmetros CRS para um determinado ponto  $(m_0, t_0)$ . O método utilizado impacta diretamente no custo computacional e na qualidade dos parâmetros estimados para aplicação do método CRS.

Basicamente, esses métodos podem ser agrupados em duas grandes categorias:

**Busca Exaustiva:** A busca exaustiva é um algoritmo de busca que consiste em enumerar todos os possíveis candidatos de uma solução e verificar se cada um satisfaz o problema. Aplicado à estimação de parâmetros CRS, esse método se traduz em computar a coerência de todos os trios de parâmetros CRS em um dado intervalo de busca, indentificar e selecionar o trio de maior coerência. Apesar de sua simplicidade, esse algoritmo sempre encontra a melhor solução, caso ela exista. Porém, seu custo computacional é proporcional ao número de soluções candidatas que, em muitos casos, especialmente no que diz respeito a sua aplicação no processamento sísmico, tende a crescer muito rapidamente conforme o número de candidatos aumenta.

Como se trata de um método de alto custo, sua aplicação depende de grande poder computacional. O uso de clusters com *Field Programmable Gate Arrays* (FPGA) (Marchetti et al., 2010) e *Graphics Processing Units* (GPU) (Borin et al., 2015), assim como de computação em nuvem (Heilmann et al., 2014) são possíveis maneiras de lidar com esse custo.

**Busca Heurística:** Buscas heurísticas são técnicas que exploram subconjuntos do espaço de soluções possíveis segundo critérios arbitrários, podendo estes serem baseados em processos físicos, em dinâmicas de populações, em processos bioinspirados etc. Em outras palavras, essas técnicas visam determinar soluções aproximadas,

---

obtidas a um baixo custo, mas que satisfaçam o problema. Nesse caso, o custo de oportunidade está na troca de precisão, acurácia e completude das soluções por uma redução de custo ou tempo de execução. Certamente, as soluções obtidas dessa forma podem não ser satisfatórias em todos os casos, mas ainda assim constituem uma opção viável, dado o alto custo associado à aplicação de buscas exaustivas.

No que diz respeito à aplicação do método CRS, diversas heurísticas de busca foram estudadas e aplicadas para estimar parâmetros (Carmo, 2004; Garabito et al., 2012). Nesse trabalho, todas as estimações de parâmetros por heurísticas serão realizadas pelo algoritmo genético *Differential Evolution* (DE). Para maiores informações sobre essa heurística e sua aplicação no método CRS, consultar Barros et al. (2015).

## 2.2.2 Estratégias de Estimação de Parâmetros

Nesse trabalho, o termo estratégia de estimação se refere ao conjunto de dados considerado na estimação de parâmetros de modo a determinar o melhor trio de parâmetros CRS para um determinado ponto  $(m_0, t_0)$ . Dependendo dos conjuntos de dados considerados, o custo associado à aplicação do método CRS se altera, assim como a qualidade do resultado final, o fluxo de trabalho necessário, o número de etapas de estimação de parâmetros e o número de etapas de controle de qualidade.

Basicamente, essas estratégias podem ser agrupadas em três categorias: Global, Local e Híbrida. Tais estratégias serão discutidas em detalhes a seguir.

### 2.2.2.1 Estimação Global

Idealmente, o processamento de um dado sísmico pelo método CRS deveria estimar todos os parâmetros CRS simultaneamente. Dessa forma, a superfície de tempo de trânsito CRS seria avaliada como um todo, ou seja, o valor de semblance computado diria respeito a todos os pontos pertencentes àquela superfície. Técnicas que se utilizem dessa estratégia serão consideradas Estratégias de Estimação Global. Em geral, tais estratégias apresentam os resultados de melhor qualidade, isto é, são capazes de encontrar os parâmetros CRS de maior coerência dentro do intervalo de estimação selecionado pelo intérprete. Os dados empilhados apresentam maior relação sinal-ruído, uma vez que todos os traços pertencentes à superfície foram considerados. Os

parâmetros CRS estimados tendem a ser mais suaves, contínuos e com pouca presença de valores espúrios ao longo de eventos coerentes lateralmente.

Como desvantagem, pode-se considerar seu alto custo computacional. Outro aspecto que pode ser considerado uma desvantagem é que apenas uma etapa de controle de qualidade é realizada no final do processo. Isso significa que caso se queira modificar algum parâmetro (aberturas, intervalos de estimação, janela de coerência, etc), todo o processo de estimação, de elevado custo, deve ser realizado novamente. Porém, essa dificuldade pode ser reduzida aplicando o método em regiões teste de menor tamanho.

A Figura 2.4 apresenta uma visão geral simplificada do fluxo de processamento CRS utilizando uma estratégia de estimação global de parâmetros. Cada etapa desse fluxo foi numerada e será descrita em detalhes a seguir:

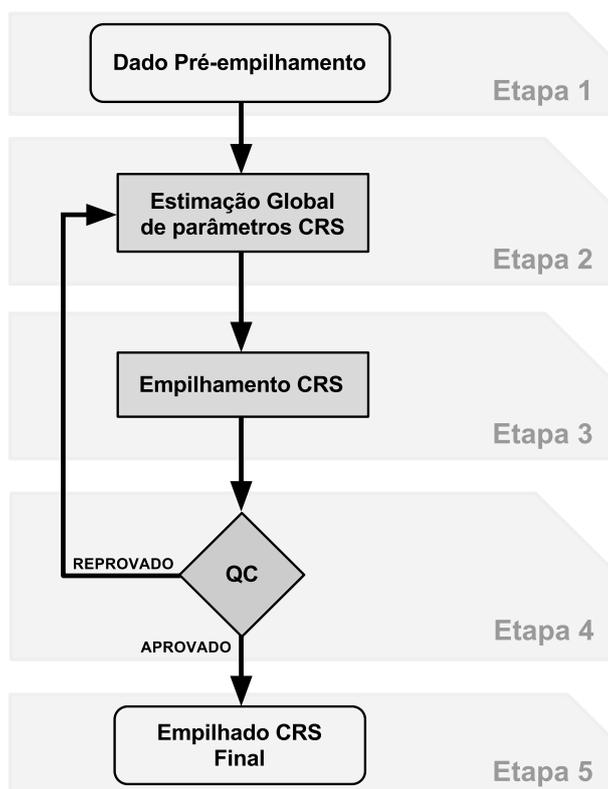


Figura 2.4: Fluxo simplificado de processamento CRS com a estratégia de estimação global de parâmetros.

---

– **Etapa 1 (Dado de entrada):**

Como dado de entrada, considera-se um dado sísmico de multicobertura (pré-empilhamento) em que todas as etapas de pré-processamento foram aplicadas. Opcionalmente, um modelo inicial de velocidades NMO suave pode ser utilizado como guia para a estimação da velocidade. Nesse caso, o intervalo de estimação para cada ponto seria um pequeno percentual do valor da guia no referido ponto. Pode-se supor que esse modelo é conhecido a priori, uma vez que a obtenção do mesmo faz parte do fluxo de processamento padrão para qualquer dado sísmico de reflexão.

– **Etapa 2 (Estimação de parâmetros CRS):**

Estimação global dos parâmetros CRS para cada amostra de tempo e posição de ponto médio. Ou seja, para cada ponto  $(m_0, t_0)$  do dado, trios de parâmetros CRS ( $A$ ,  $B$  e  $C$ ) são considerados e suas coerências são computadas para um dado conjunto de parâmetros de aberturas (aberturas em afastamentos, pontos médios e janelas de tempo) e intervalos de estimação selecionados por um intérprete. O trio de maior coerência é selecionado e salvo para cada ponto  $(m_0, t_0)$ .

Nesse caso, dependendo de poder computacional disponível os seguintes métodos de estimação podem ser considerados: Busca exaustiva ou Heurísticas.

– **Etapa 3 (Empilhamento CRS):**

Com os parâmetros CRS estimados, o dado sísmico é empilhado utilizando a superfície de tempo de trânsito CRS definida em cada  $(m_0, t_0)$  pelos parâmetros CRS. Parâmetros de abertura (aberturas em afastamentos, pontos médios e janelas de tempo) para o empilhamento são selecionadas pelo intérprete e podem diferir dos utilizados no processo de estimação. Mais detalhes sobre aberturas de estimação e empilhamento serão apresentados no Capítulo 3.

– **Etapa 4 (Controle de qualidade):**

Uma etapa de controle de qualidade (ou QC, do inglês *Quality Control*) deve ser realizada para atestar a qualidade do resultado obtido. Nesse momento,

os intervalos de estimação de parâmetros podem ser revistos, assim como os parâmetros de abertura. Caso haja necessidade de alteração em algum destes, uma nova etapa de estimação deve ser realizada, seguido de um novo empilhamento e controle de qualidade.

– **Etapa 5 (Empilhamento CRS final):**

O dado de entrada é empilhado utilizando a superfície de tempo de trânsito CRS com os parâmetros CRS e de aberturas obtidos na iteração final.

Para fins de comparação com as outras estratégias que serão apresentadas a seguir, os resultados finais obtidos na aplicação da estratégia global em um dado real terrestre são apresentados na Figura 2.5. A busca heurística DE foi utilizada como método de estimação e todos os parâmetros de processamento (a saber: aberturas de estimação e de empilhamento, janelas de coerência, modelo de velocidade NMO inicial, intervalos de estimação e discretização das buscas) foram fixados nesse e nos exemplos futuros.

Na Figura 2.5(b) podemos observar o modelo de velocidades NMO refinado (parâmetro  $C$  convertido em velocidade pela Equação 2.5), a partir do modelo inicial suave, o qual maximiza o valor de *Semblance* em cada ponto  $(m_0, t_0)$ . Note que, apesar da alta frequência introduzida no processo de refinamento, a velocidade obtida ainda apresenta certa suavidade. Isso significa que a tendência de variação de velocidades introduzida pela guia foi preservada. O mesmo não pode ser observado em todos os pontos dos parâmetros  $A$  e  $B$ , exceto ao longo dos eventos coerentes. Fora dessas regiões de maior coerência, o método de estimação não foi capaz de encontrar valores que obedecem a tendência observada no dado. Nessas regiões valores espúrios de parâmetros foram estimados, podendo estes se orientar na direção de ruídos e construir eventos artificiais (vulgarmente conhecidos como “minhocas”).

O custo computacional despendido na aplicação dessa estratégia de estimação foi estimado com base no número de *semblances* computadas por amostra do dado e pode ser observado na Tabela 2.1.

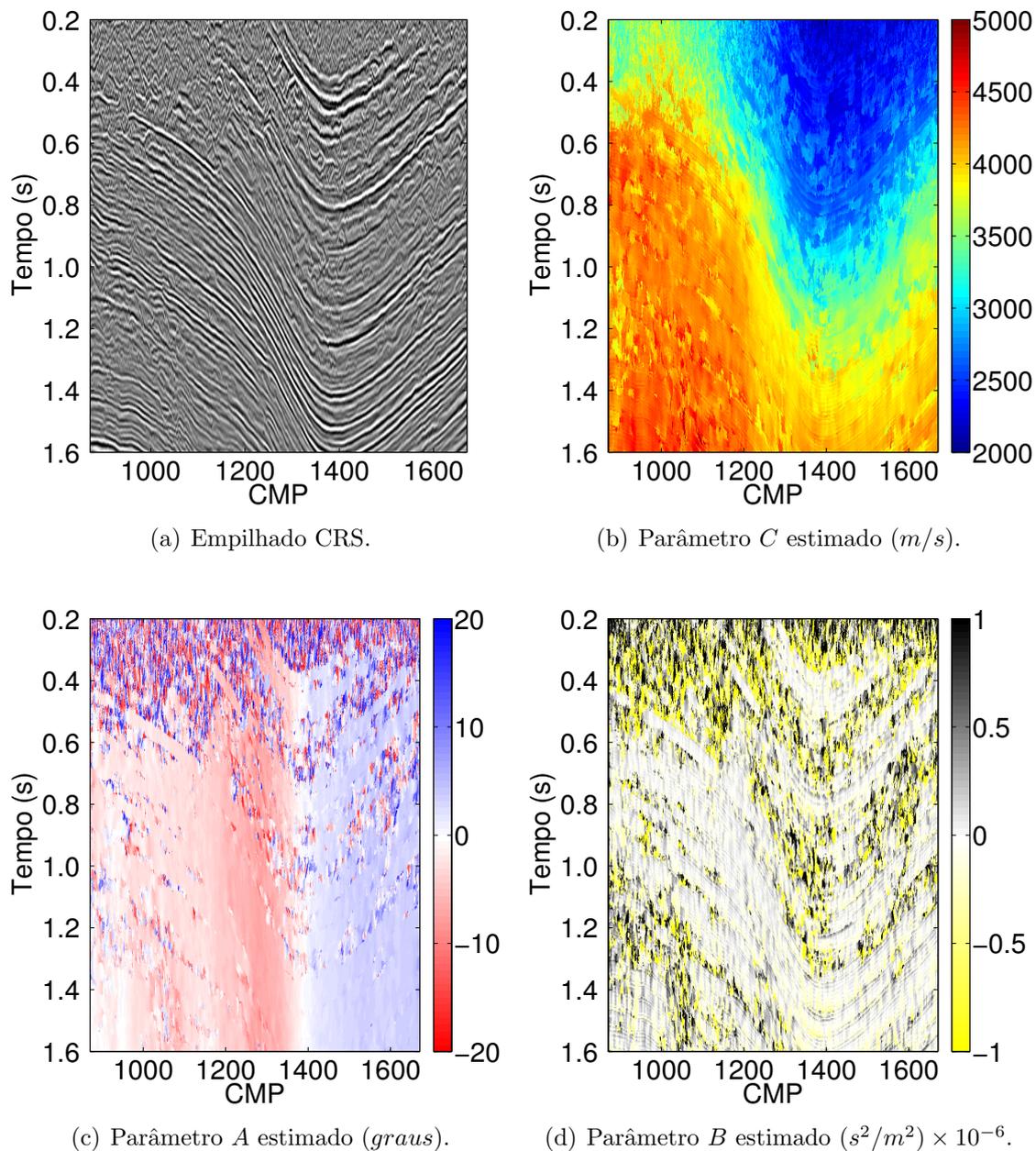


Figura 2.5: Resultados obtidos utilizando a estratégia de estimação global de parâmetros CRS com aberturas fixas em meio afastamentos e pontos médios de 1300 m e 230 m, respectivamente. Os parâmetros  $A$  e  $C$  foram convertidos em ângulos de emergência e velocidades (Equação 2.5).

### 2.2.2.2 Estimação Local

O processo de estimação de parâmetros CRS pode ser dividido em etapas, as quais são responsáveis pela estimação de um ou mais parâmetros. Nesse caso, a estimação local representa a estratégia de estimação mais simples e de menor custo computacional.

Introduzida por Müller (1999), essa estratégia estima individualmente cada um dos três parâmetros CRS, explorando dois subconjuntos particulares do dado sísmico de multicobertura. O primeiro subconjunto diz respeito às famílias CMP, nas quais a estimação do parâmetro  $C$  é realizada para cada amostra de tempo (equivalente ao empilhamento CMP). O segundo subconjunto trata-se do dado empilhado obtido no empilhamento NMO, utilizando o parâmetro  $C$  (ou velocidade) estimado anteriormente. Nesse dado empilhado, os parâmetros  $A$  e  $B$  serão estimados. O parâmetro  $A$  é estimado para uma abertura em pontos médios pequena e o parâmetro  $B$  é estimado para aberturas maiores, utilizando o parâmetro  $A$  estimado anteriormente. Uma vez com todos os parâmetros CRS estimados, um processo de refino global desses parâmetros é realizado e o dado empilhado com os novos parâmetros refinados aplicados na equação da superfície de tempo de trânsito CRS.

Por utilizar os menores subconjuntos do dado sísmico de multicobertura e estimar um parâmetro CRS por vez, essa estratégia pode ser considerada a de menor custo computacional, mesmo quando empregada a busca exaustiva como método de estimação. Nesse caso, o método de estimação exaustivo é fortemente recomendado. Porém, esse baixo custo traz algumas desvantagens. Os resultados obtidos pela estratégia de estimação local tendem a apresentar grande quantidade de valores espúrios e falta de continuidade nos eventos de reflexão. Pode-se dizer que esse resultado é esperado, uma vez que apenas parte da redundância contida na superfície de tempo de trânsito CRS é utilizada. Além disso, os valores espúrios estimados em uma etapa influenciam as etapas seguintes, propagando erros de estimação em um efeito cascata. Por exemplo, caso os valores estimados para o parâmetro  $C$  sejam influenciados por ruído, o dado empilhado com esses parâmetros também será. Como as estimações do parâmetros  $A$  e  $B$  serão realizadas nesse dado empilhado contaminado por ruído, os parâmetros  $A$  e  $B$  também serão comprometidos. Em alguns casos, mesmo a

etapa de refino não é capaz de acrescentar qualidade ao dado processado, pois os parâmetros foram tão comprometidos pelo ruído e pela baixa quantidade de traços que seus valores divergiram completamente da tendência esperada.

A seguir, a Figura 2.6 apresenta uma visão geral simplificada o fluxo de processamento CRS baseado na estratégia de estimação local. Cada etapa do fluxo foi numerada e será discutida a seguir:

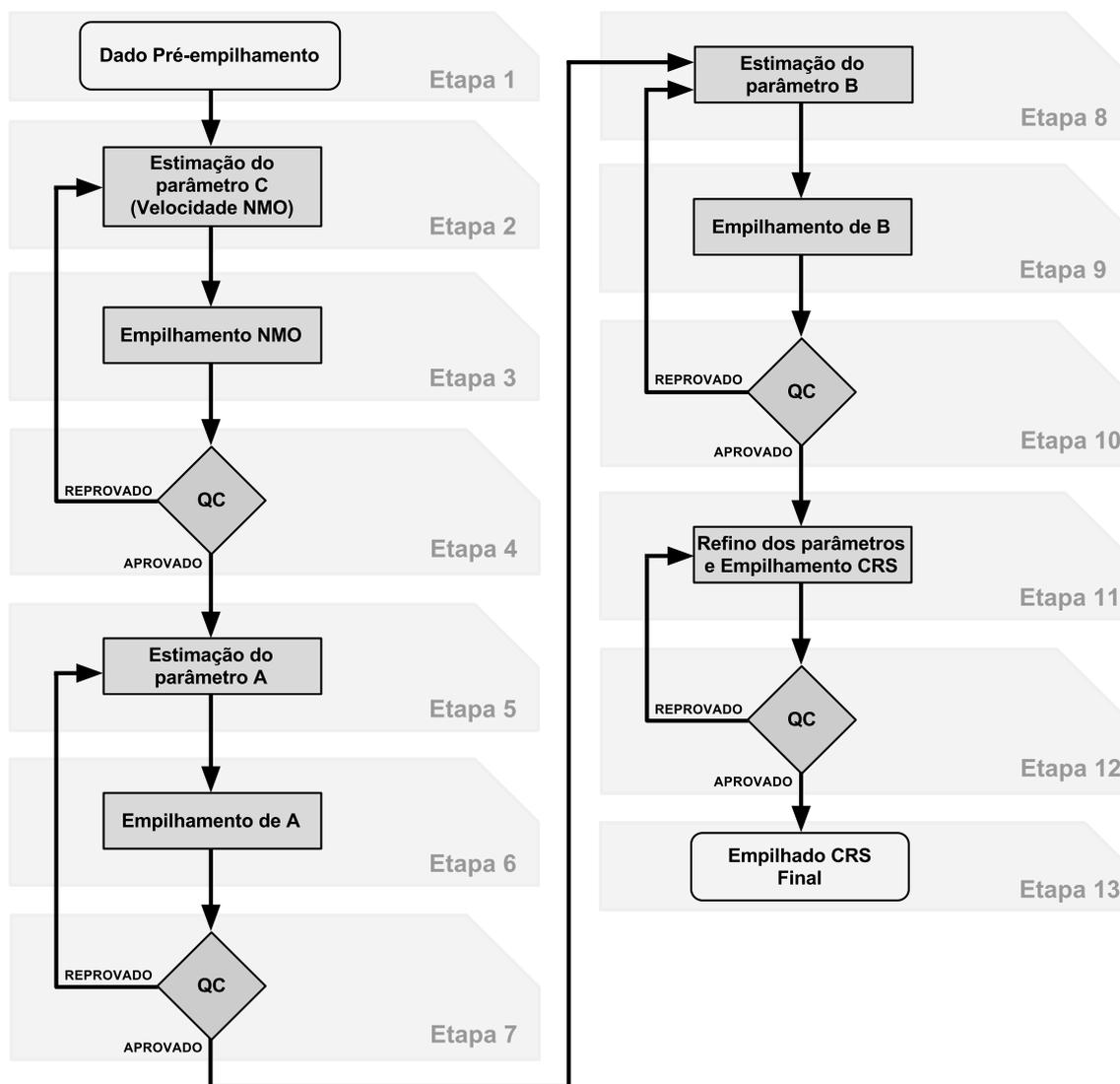


Figura 2.6: Fluxo simplificado de processamento CRS com a estratégia de estimação local de parâmetros.

– **Etapa 1 (Dado de entrada):**

Novamente, será considerado um dado sísmico pré-empilhamento em que se supõe que todas as etapas de pré-processamento foram aplicadas. Opcionalmente, um modelo de velocidades NMO pode ser utilizado como guia.

– **Etapa 2 (Estimação de  $C$ ):**

Estimação do parâmetro  $C$  considerando a situação em que  $m = m_0$  na Equação 2.4, que resulta em

$$t_{CRS}^2(m_0, h) = t_0^2 + Ch^2 = t_0^2 + \frac{4h^2}{v_{NMO}^2} = t_{CMP}^2(h). \quad (2.7)$$

Nesse caso, nenhum CMP vizinho será considerado e essa etapa é similar ao processamento pelo método CMP, porém com o seguinte diferencial: o parâmetro  $C$  é estimado por busca exaustiva para cada ponto  $(m_0, t_0)$ .

Se uma guia de velocidades for utilizada, o intervalo de estimação para cada ponto deve ser um pequeno percentual em torno do valor definido pela guia.

– **Etapa 3 (Empilhamento NMO):**

O dado sísmico pré-empilhamento de entrada é empilhado usando a Equação 2.7. Nessa etapa, os únicos parâmetros de abertura considerados são: abertura na direção dos afastamentos e janelas de tempo para cálculo da medida de coerência.

– **Etapa 4 (Controle de qualidade):**

Controle de qualidade do dado empilhado obtido. Nesse momento, os intervalos de estimação do parâmetro  $C$  devem ser revisados, assim como os parâmetros de abertura.

– **Etapa 5 (Estimação de  $A$ ):**

A estimação do parâmetro  $A$  é realizada considerando o dado empilhado obtido na etapa anterior. Nesse caso, temos que  $h = 0$  na Equação 2.4, que fornece

$$t_{CRS}^2(m, 0) = [t_0 + A(m - m_0)]^2 + B(m - m_0)^2 \quad (2.8)$$

Além disso, pode-se considerar uma abertura na direção dos pontos médios suficientemente pequena, de modo a garantir que o parâmetro  $B$  possa ser considerado zero, ou seja, que podemos considerar que o evento de reflexão seja localmente plano. Nesse caso temos

$$t_{CRS}(m, 0) = t_0 + A(m - m_0). \quad (2.9)$$

Finalmente, uma busca exaustiva para estimar o parâmetro  $A$  é realizada utilizando a Equação 2.9.

– **Etapa 6 (Empilhamento de  $A$ ):**

Um novo dado empilhado é obtido a partir do re-empilhamento do dado obtido na Etapa 3. Para todos os pontos  $(m_0, t_0)$ , o parâmetro  $A$  é utilizado para empilhar as amostras interceptadas pela reta definida pela Equação 2.9.

– **Etapa 7 (Controle de qualidade):**

Controle de qualidade do dado empilhado obtido na Etapa 6. Nesse momento, os intervalos de estimação do parâmetro  $A$  devem ser revisados, assim como os parâmetros de abertura.

– **Etapa 8 (Estimação de  $B$ ):**

Com o parâmetro  $A$  conhecido para cada  $(m_0, t_0)$ , o parâmetro  $B$  pode ser estimado utilizando a Equação 2.8. A abertura na direção dos pontos médios deve ser maior que a utilizada na Etapa 5 de modo a permitir que a curva de tempo de trânsito se ajuste ao dado.

– **Etapa 9 (Empilhamento de  $B$ ):**

Um novo dado empilhado é obtido a partir do re-empilhamento do dado obtido na Etapa 3. Para todos os pontos  $(m_0, t_0)$ , os parâmetros  $A$  e  $B$  são utilizados para empilhar as amostras interceptadas pela curva definida pela Equação 2.8.

---

– **Etapa 10 (Controle de qualidade):**

Controle de qualidade do dado empilhado obtido na Etapa 9. Nesse momento, os intervalos de estimação do parâmetro  $B$  devem ser revisados, assim como os parâmetros de abertura.

– **Etapa 11 (Refino dos parâmetros):**

Refino global dos três parâmetros CRS utilizando os valores estimados anteriormente como valores iniciais. Essa etapa visa maximizar o ajuste da superfície de tempo de trânsito CRS (Equação 2.4) ao dado. Essa etapa se faz necessária devido ao fato de que estes parâmetros não foram estimados simultaneamente.

Apesar de esse processo de refinamento global ser exatamente igual ao apresentado na estratégia de estimação global, Seção 2.2.2.1, seu custo computacional é consideravelmente menor, pois os parâmetros CRS estimados individualmente são considerados como valores iniciais para o método de estimação, fazendo com que o intervalo de busca seja drasticamente reduzido quando comparado com o intervalo da estratégia global.

– **Etapa 12 (Controle de qualidade):**

Etapa de controle de qualidade final. Os parâmetros de abertura são revisados. Caso haja necessidade de alteração em algum destes, uma nova etapa de refino deve ser realizada.

– **Etapa 13 (Empilhado CRS final):**

O dado de entrada é empilhado utilizando o tempo de trânsito CRS com os parâmetros CRS e de abertura obtidos na iteração final.

Os resultados obtidos em cada etapa de aplicação da estratégia local para o mesmo dado real terrestre são apresentados a seguir. Como trata-se de uma estratégia que utiliza os menores subconjuntos possíveis do dado de entrada, o método de estimação por busca exaustiva foi utilizado em todas as etapas, exceto a de refino global, onde a busca heurística DE é utilizada.

A Figura 2.7 apresenta o dado empilhado CMP e o parâmetro  $C$  estimado obtidos nas Etapas 2 e 3. Comparando o dado empilhado obtido na Figura 2.7(a) com o da

---

Figura 2.5(a), pode-se notar uma grande diferença, tanto no que diz respeito ao realce dos eventos quanto na presença de ruídos. Com relação ao parâmetro estimado, o parâmetro  $C$ , a guia inicial preservou a tendência de variação esperada.

Prosseguindo com o processamento CRS pela estratégia de estimação local, o dado empilhado da Figura 2.7(a) será considerado como dado de entrada para a estimação e empilhamento dos parâmetros  $A$  e  $B$ , Etapas 5, 6, 8 e 9 (Figuras 2.8 e 2.9). Comparando tais resultados com os obtidos na estratégia global, pode-se observar que há uma considerável perda de qualidade. Os parâmetros  $A$  e  $B$  estimados pela estratégia local, Figuras 2.8(b) e 2.9(b), se apresentam muito mais contaminados com valores espúrios, mesmo em regiões onde eventos bem definidos estão presentes. Esse resultado deve-se ao reduzido espaço de estimação, composto apenas pelo dado empilhado CMP, considerado na estimação dos parâmetros  $A$  e  $B$ . Como consequência disso, os dados empilhados obtidos nas Etapas 6 e 9, Figuras 2.8(a) e 2.9(a), ficaram comprometidos.

Para melhorar o ajuste desses parâmetros estimados localmente e obter um dado empilhado CRS de melhor qualidade, um processo de refinamento global utilizando a busca heurística DE (Etapa 11) é realizado. A Figura 2.10 apresenta os resultados obtidos para o empilhado CRS e os parâmetros CRS refinados. Nela, é possível observar um expressivo aumento de qualidade, ou seja, redução dos valores espúrios observados anteriormente e um aumento de continuidade ao longo dos eventos coerentes. Esse resultado demonstra como a etapa de refino global é importante na aplicação da estratégia de estimação local. Porém, ainda assim, esse resultado perde para o obtido na estratégia global.

Com relação ao custo computacional despendido na aplicação dessa estratégia de estimação, observou-se uma redução de cerca 86,5% em relação à estratégia de estimação global. Mais informações sobre o custo computacional, estimado em relação ao número de semblances computadas por amostra, podem ser encontradas na Tabela 2.1.

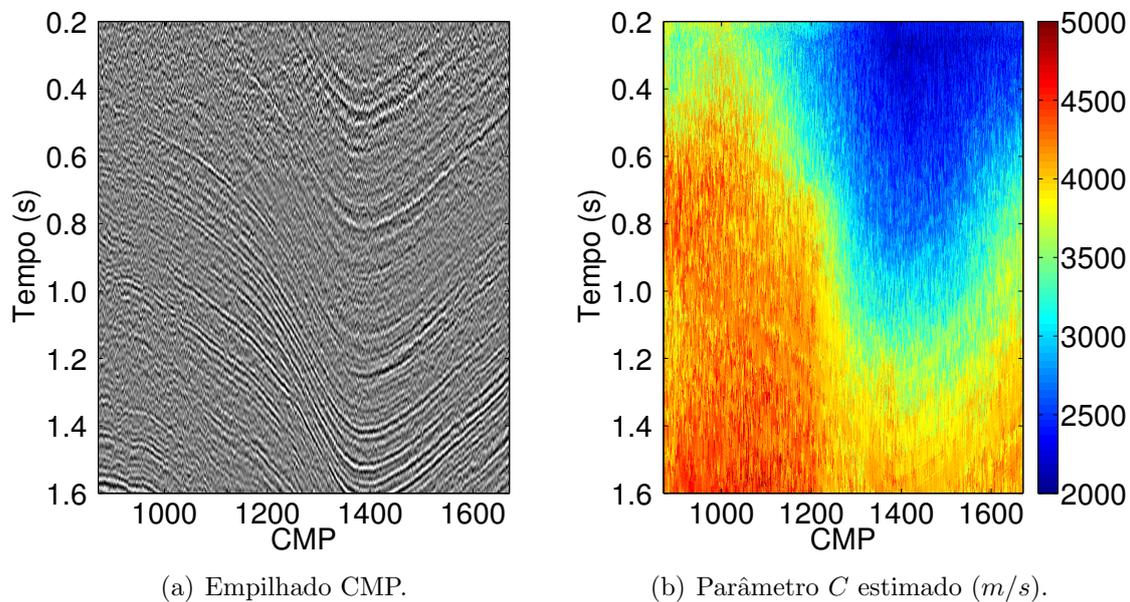


Figura 2.7: Resultados obtidos utilizando a estratégia de estimação local (Etapa 3) para o parâmetro  $C$  com abertura fixa em meio afastamentos de 1300 m. O parâmetro  $C$  foi convertido em velocidades (Equação 2.5).

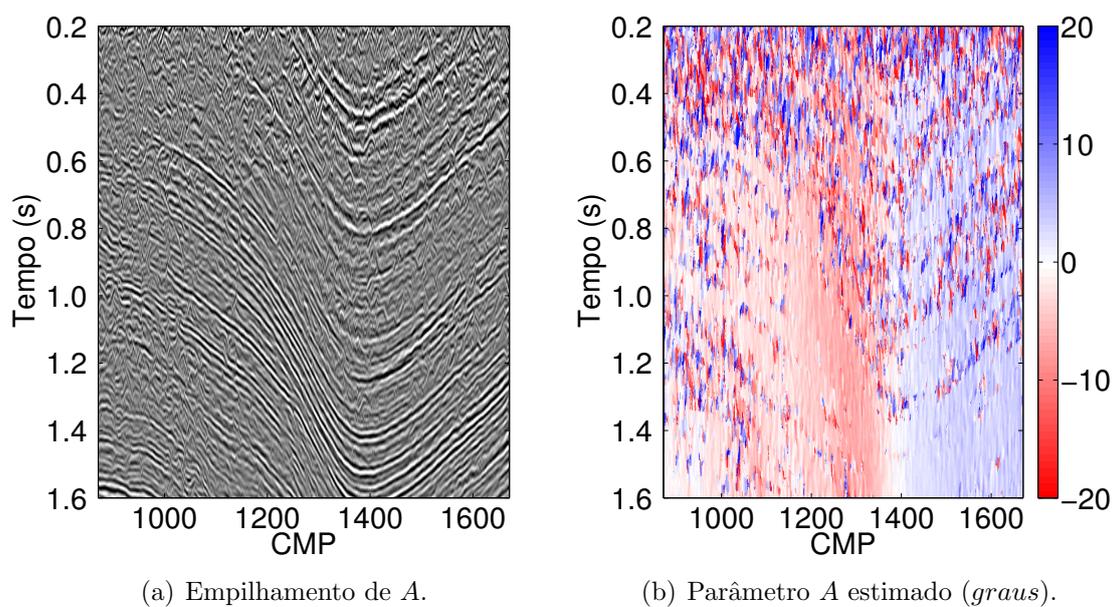


Figura 2.8: Resultados obtidos utilizando a estratégia de estimação local (Etapa 6) para o parâmetro  $A$  com abertura fixa em pontos médios de 230 m. O parâmetro  $A$  foi convertido em ângulos de emergência (Equação 2.5).

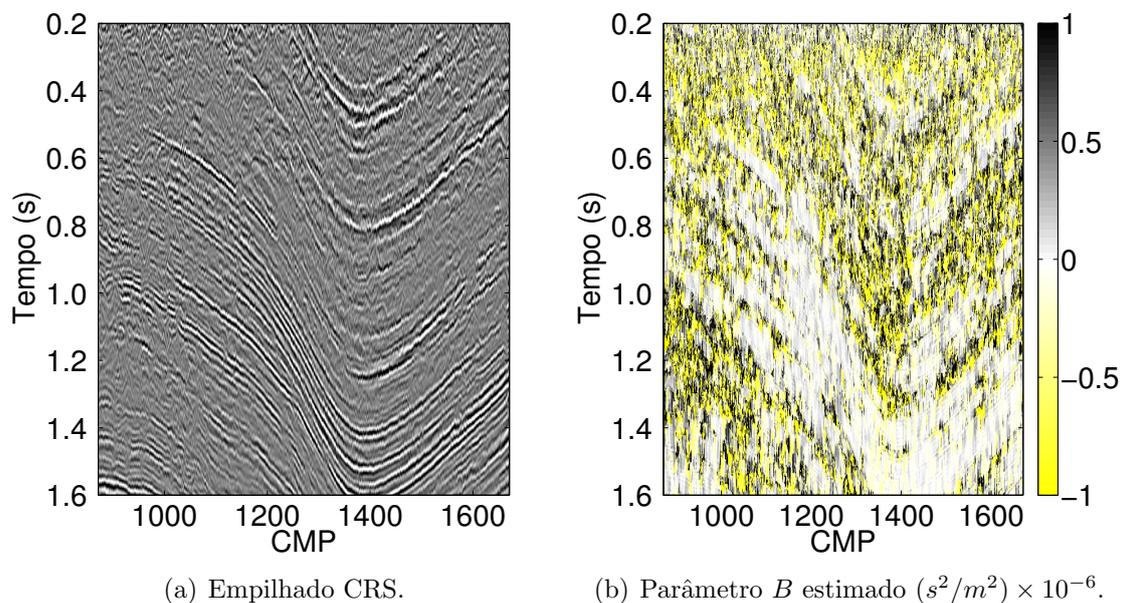


Figura 2.9: Resultados obtidos utilizando a estratégia de estimação local (Etapa 9) para o parâmetro  $B$ .

### 2.2.2.3 Estimação Híbrida

Além das estratégias de estimação de parâmetros CRS global e local, é possível propor uma terceira estratégia que se utiliza de estimacões globais e locais em subconjuntos do dado sísmico de multicobertura. Essa estratégia de estimação híbrida separa o fluxo de processamento em duas etapas e permite a combinação de métodos de estimação por buscas heurísticas e exaustivas nesses subconjuntos.

A estratégia apresentada a seguir, baseada no trabalho de Garabito et al. (2001), estima os parâmetros CRS em duas etapas. A primeira realiza uma estimação global, que estima simultaneamente os parâmetros  $A$  e  $C$  considerando um caso particular da equação da superfície de tempo de trânsito CRS, onde o parâmetro  $B$  é considerado igual ao parâmetro  $C$ . Nesse caso, as buscas heurísticas são consideradas como métodos de estimação. Na segunda etapa uma estimação local é realizada e tem como objetivo estimar apenas o parâmetro  $B$ , uma vez que os parâmetros  $A$  e  $C$  são conhecidos. Por se tratar de apenas um parâmetro, buscas exaustivas podem ser utilizadas. Finalmente, esses parâmetros passam por um processo de refino, em

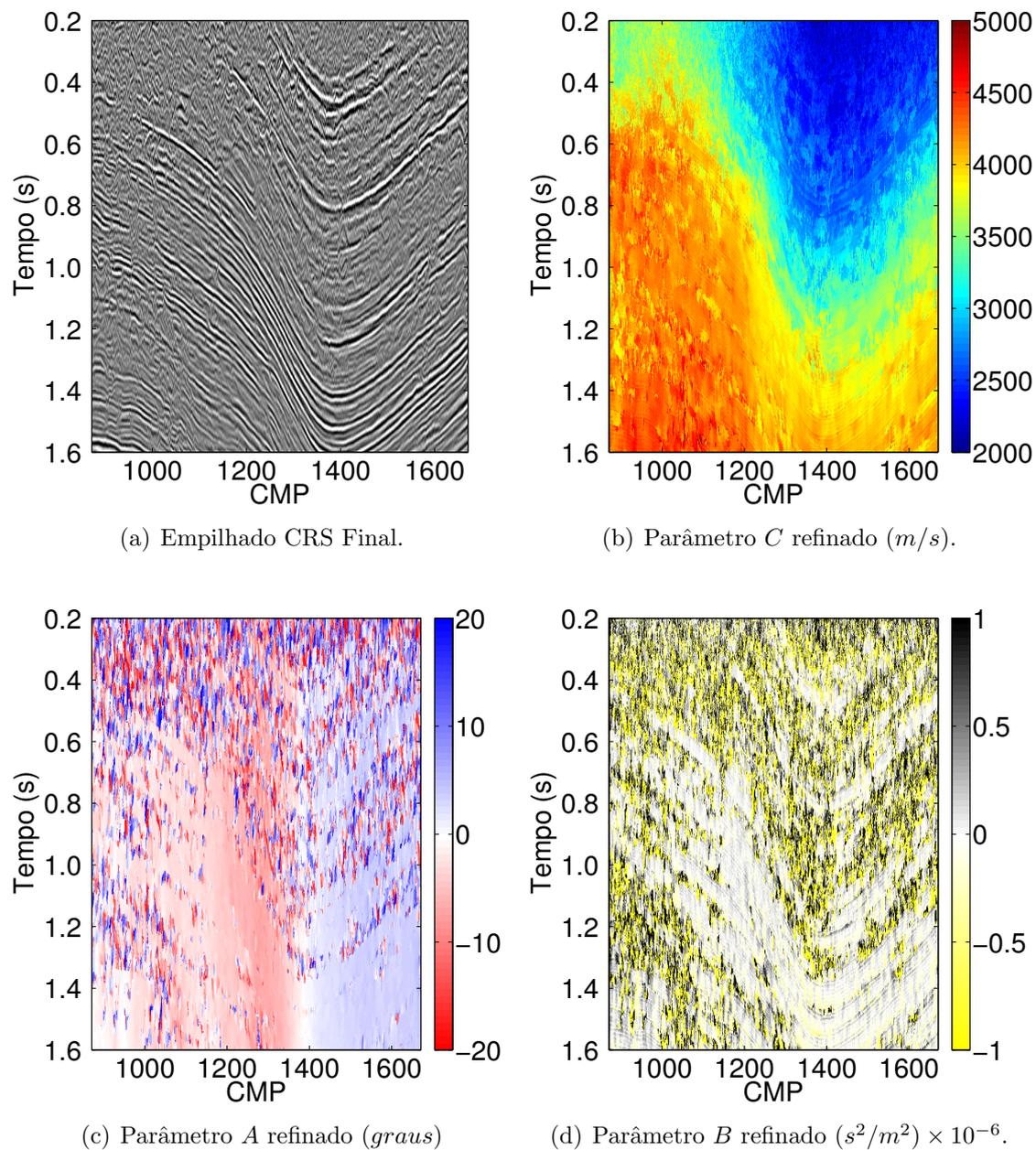


Figura 2.10: Resultados finais (parâmetros refinados) obtidos utilizando a estratégia de estimação local (Etapa 13) de parâmetros CRS com aberturas fixas em meio afastamentos e pontos médios de 1300 m e 230 m, respectivamente. Os parâmetros CRS  $A$  e  $C$  foram convertidos em ângulos de emergência e velocidades (Equação 2.5).

que uma nova estimação global é realizada, utilizando esses parâmetros como valores iniciais, de modo a melhorar seu ajuste com o dado.

Os resultados obtidos aplicando essa estratégia tendem a ser ligeiramente inferiores aos obtidos na estratégia global. Contudo, por utilizar duas etapas para estimar os parâmetros CRS, um intérprete tem maior controle sobre o processamento, podendo este identificar e sanar problemas com aberturas e intervalos de estimação mais rapidamente que na estratégia global.

A Figura 2.11 apresenta uma visão geral simplificada do fluxo de processamento CRS utilizando uma estratégia de estimação híbrida de parâmetros. Cada etapa desse fluxo foi numerada e será descrita em detalhes a seguir:

– **Etapa 1 (Dado de entrada):**

Será considerado um dado sísmico de multicobertura (pré-empilhamento) em que todas as etapas de pré-processamento foram aplicadas. Opcionalmente, um modelo inicial de velocidades NMO suave pode ser utilizado como guia para a estimação da velocidade.

– **Etapa 2 (Estimação de  $A$  e  $C$ ):**

Estimação global dos parâmetros  $A$  e  $C$  considerando o caso particular em que  $B = C$  na equação que define superfície de tempo de trânsito CRS (Equação 2.4). Nesse caso, temos

$$t_{CRS-D}^2(m, h) = [t_0 + A(m - m_0)]^2 + C[(m - m_0)^2 + h^2]. \quad (2.10)$$

Essa equação é conhecida na literatura como superfície de tempo de trânsito CRS para difrações (CRS-D).

Parâmetros de abertura e intervalos de estimação são selecionados pelo intérprete. Nessa etapa, recomendam-se aberturas em pontos médios pequenas, uma vez que temos um tempo de trânsito para difrações sendo utilizado para aproximar e empilhar reflexões. Os métodos de estimação possíveis para essa etapa seriam: Busca exaustiva ou heurística.

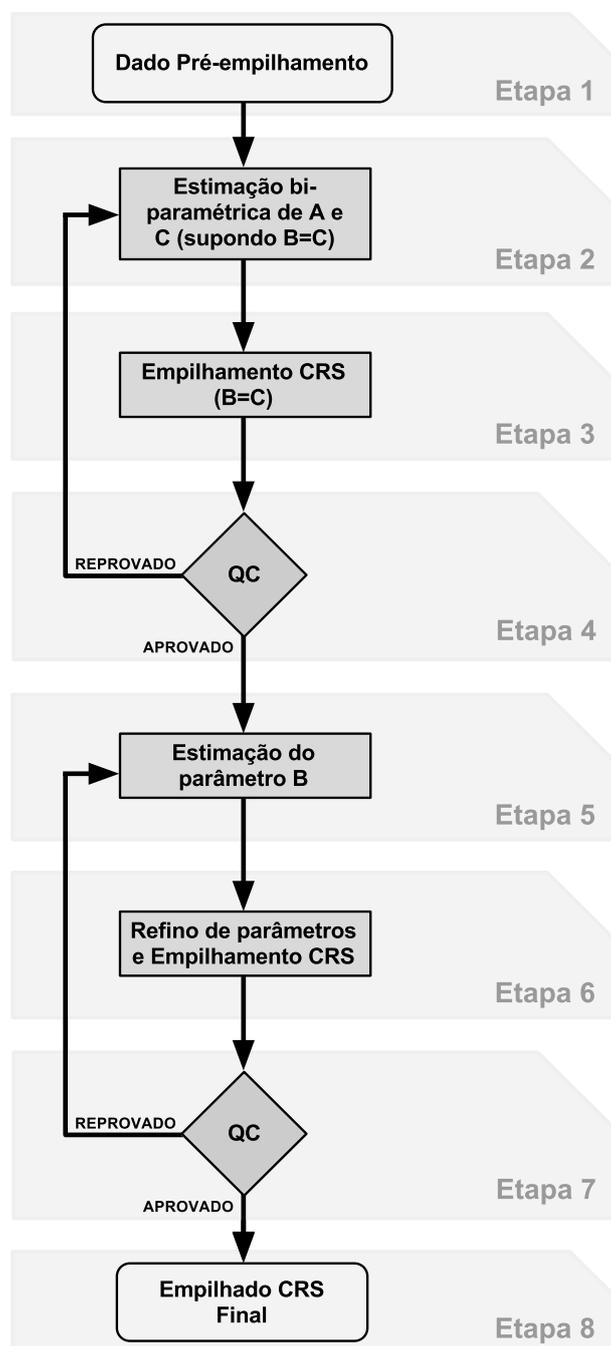


Figura 2.11: Fluxo simplificado de processamento CRS com a estratégia de estimação híbrida de parâmetros.

---

– **Etapa 3 (Empilhamento CRS  $B = C$ ):**

Empilhamento do dado de entrada considerando os mesmos parâmetros de abertura e a mesma superfície de tempo de trânsito CRS para difrações empregada na etapa de estimação dos parâmetros.

– **Etapa 4 (Controle de qualidade):**

O controle de qualidade dos intervalos de estimação dos parâmetros ( $A$  e  $C$ ) e dos parâmetros de abertura, com especial atenção às aberturas em pontos médios. Deve-se verificar se as regiões com curvatura negativa (ou seja, estruturas sinclinais, que fornecem valores negativos de parâmetro  $B$ ) estão sendo comprometidas pela aproximação para difrações, que compreende curvaturas exclusivamente positivas. Por esse motivo, recomenda-se o uso de aberturas pequenas na direção dos pontos médios.

Caso haja necessidade de alteração em algum desses parâmetros, uma nova etapa de estimação deve ser realizada.

– **Etapa 5 (Estimação de  $B$ ):**

Com os parâmetros  $A$  e  $C$  estimados, realiza-se uma nova estimação onde a imposição de que  $B = C$  é eliminada. Utilizando a superfície de tempo de trânsito CRS, Equação 2.4, com  $h = 0$  e o parâmetro  $A$  conhecido, o parâmetro  $B$  é estimado no dado empilhado obtido na Etapa 3. Ao final dessa etapa, os três parâmetros CRS são conhecidos para cada ponto  $(m_0, t_0)$ .

Como se trata da estimação de apenas um parâmetro, a busca exaustiva é viável e recomendada.

– **Etapa 6 (Refino dos parâmetros):**

Refino global dos três parâmetros CRS utilizando os valores estimados anteriormente como valores iniciais. Essa etapa visa maximizar o ajuste da superfície de tempo de trânsito CRS (Equação 2.4) ao dado. Essa etapa se faz necessário devido ao fato de que estes parâmetros não foram estimados conjuntamente.

– **Etapa 7 (Controle de qualidade):**

Etapa de controle de qualidade final. Os intervalos de estimação de  $B$  e parâmetros de abertura são revisados. Nesse momento, a influência do parâmetro  $B$  no empilhamento final é comparada com o resultado obtido no empilhamento  $B = C$ .

Caso haja necessidade de alteração em algum desses parâmetros de abertura e estimação, uma nova etapa de estimação de  $B$  deve ser realizada.

– **Etapa 8 (Empilhado CRS final):**

O dado de entrada é empilhado utilizando o tempo de trânsito CRS com os parâmetros CRS e de abertura obtidos na iteração final.

Os resultados obtidos na aplicação da estratégia híbrida para o mesmo dado real terrestre apresentado anteriormente são apresentados a seguir. Na Figura 2.12, temos os resultados obtidos nos processos de estimação dos parâmetros  $A$  e  $C$  (Etapa 2), utilizando a busca heurística DE, e seu posterior empilhamento (Etapa 3). O dado empilhado CRS ( $B = C$ ) obtido, Figura 2.12 (a), foi capaz de realçar os eventos de reflexão sem comprometer as regiões de curvatura negativa (estruturas sinclinais), sinal de que a abertura em pontos médios foi adequada. Assim como no exemplo anterior, da estratégia global, o modelo de velocidades obtido, Figura 2.12 (b), manteve a suavidade imposta pela guia inicial. O parâmetro  $A$ , Figura 2.12 (c), forneceu resultados satisfatórios ao longo dos eventos coerentes e valores espúrios fora destes, assim como observado nas estratégias global e local. Porém, ao comparar esse resultado com os obtidos na estratégia global, Figura 2.5, pode-se observar que a estratégia híbrida se apresenta mais ruidosa, mesmo nas posições mais favoráveis (eventos coerentes).

Com os parâmetros  $A$  e  $C$  estimados, a estimação do parâmetro  $B$  é realizada por uma busca exaustiva (Etapa 5). O dado empilhado CRS, bem como o parâmetro  $B$  estimado podem ser vistos na Figura 2.13. Novamente, assim como observado na estimação do parâmetro  $A$ , o parâmetro  $B$  obtido também não apresentou qualidade similar a obtida na estratégia global. Porém, tais diferenças são esperadas, dado que as estimações se deram utilizando aproximações e subconjuntos do dado de entrada. Por final, os valores estimados para os parâmetros CRS são considerados como valores iniciais para um processo de refinamento global utilizando a busca heurística DE

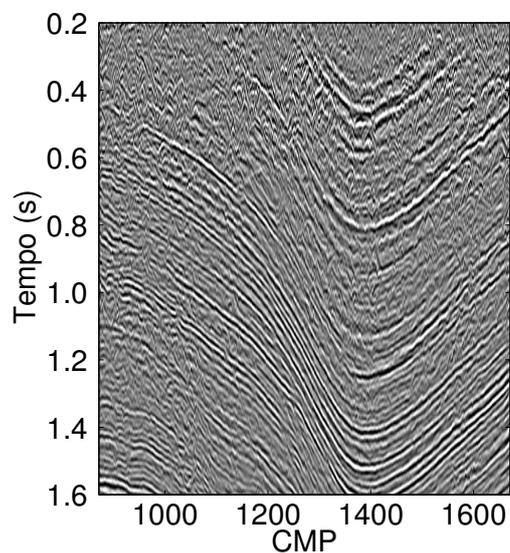
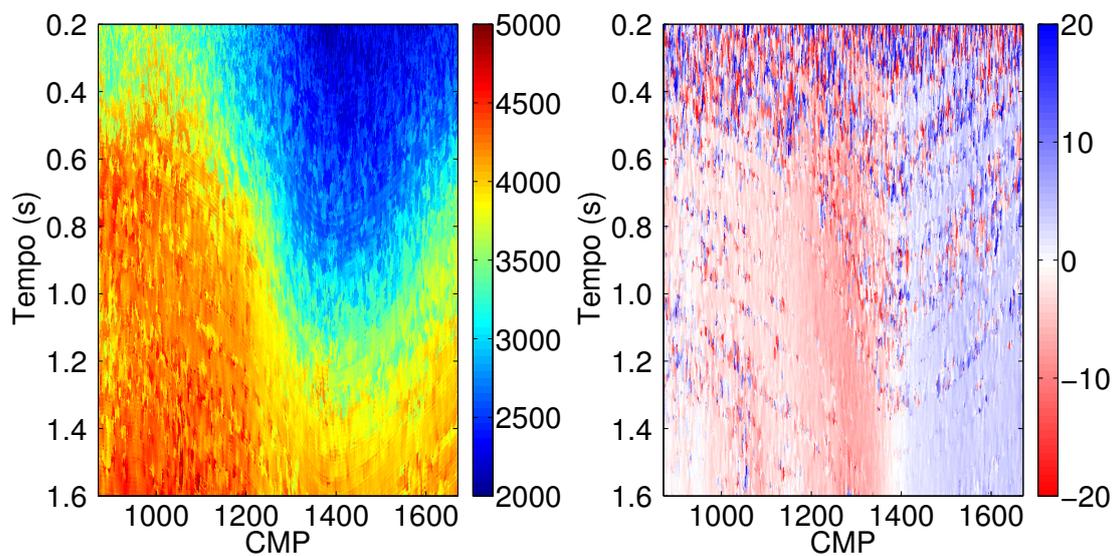
(a) Empilhado CRS ( $B = C$ ).(b) Parâmetro  $C$  estimado ( $m/s$ ).(c) Parâmetro  $A$  estimado ( $graus$ ).

Figura 2.12: Resultados obtidos utilizando a estratégia de estimação híbrida (Etapas 2 e 3) de parâmetros CRS com aberturas fixas em meio afastamentos e pontos médios de 1300 m e 230 m, respectivamente. Os parâmetros  $A$  e  $C$  foram convertidos em ângulos de emergência e velocidades (Equação 2.5).

(Etapa 6). A Figura 2.14 apresenta os resultados obtidos para o empilhado CRS e os parâmetros CRS refinados. Note que, após o processo de refino global, tais resultados se aproximam muito dos obtidos na estratégia de estimação global, Figura 2.5.

Informações sobre os parâmetros de execução e o custo computacional associado a aplicação dessa estratégia podem ser encontradas na Tabela 2.1, onde pode-se observar que a estratégia de estimação híbrida apresentou uma redução de cerca de 67,5% em relação ao custo da estratégia de estimação global.

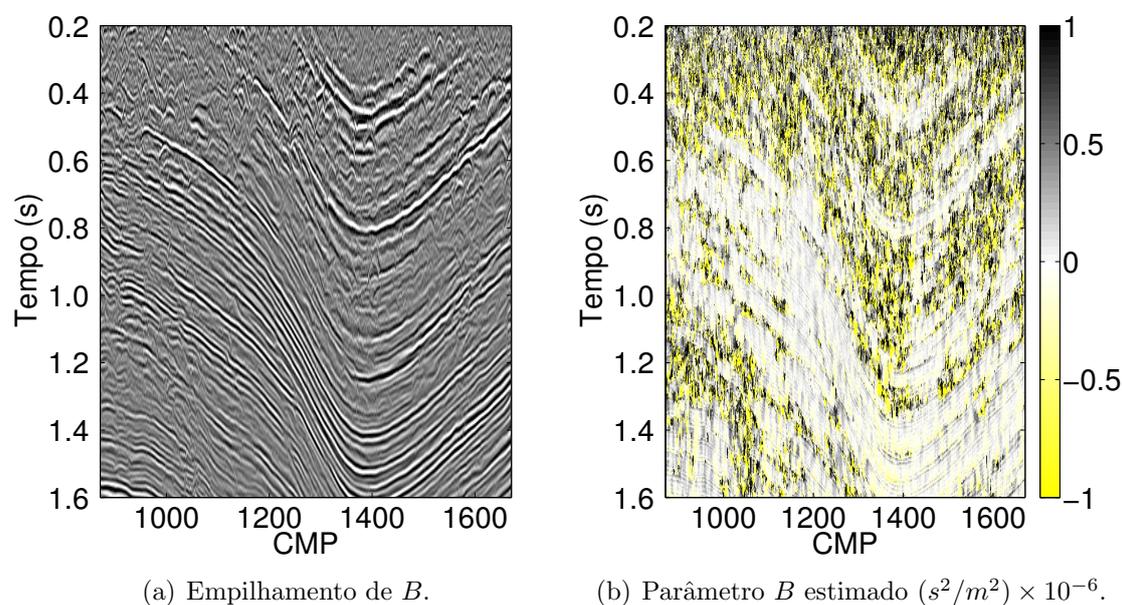


Figura 2.13: Resultados obtidos na estratégia de estimação híbrida (Etapa 6) para o parâmetro  $B$  com abertura fixa em pontos médios de 230 m.

### Comparação de resultados: Global *vs* Local *vs* Híbrida

Para facilitar a comparação entre os resultados obtidos na aplicação dos métodos CMP e CRS (utilizando as estratégias global, local e híbrida), as Figuras 2.15 e 2.16 apresentam seus respectivos dados empilhados para duas regiões distintas do dado real terrestre utilizado anteriormente.

Com relação à qualidade dos resultados obtidos, observando as Figuras 2.15 e 2.16 fica evidente que a estratégia de estimação global apresentou resultados superiores, tanto no que diz respeito ao dado empilhado quando aos parâmetros CRS estimados. Logo em seguida, com resultados ligeiramente inferiores aos da estratégia global, a

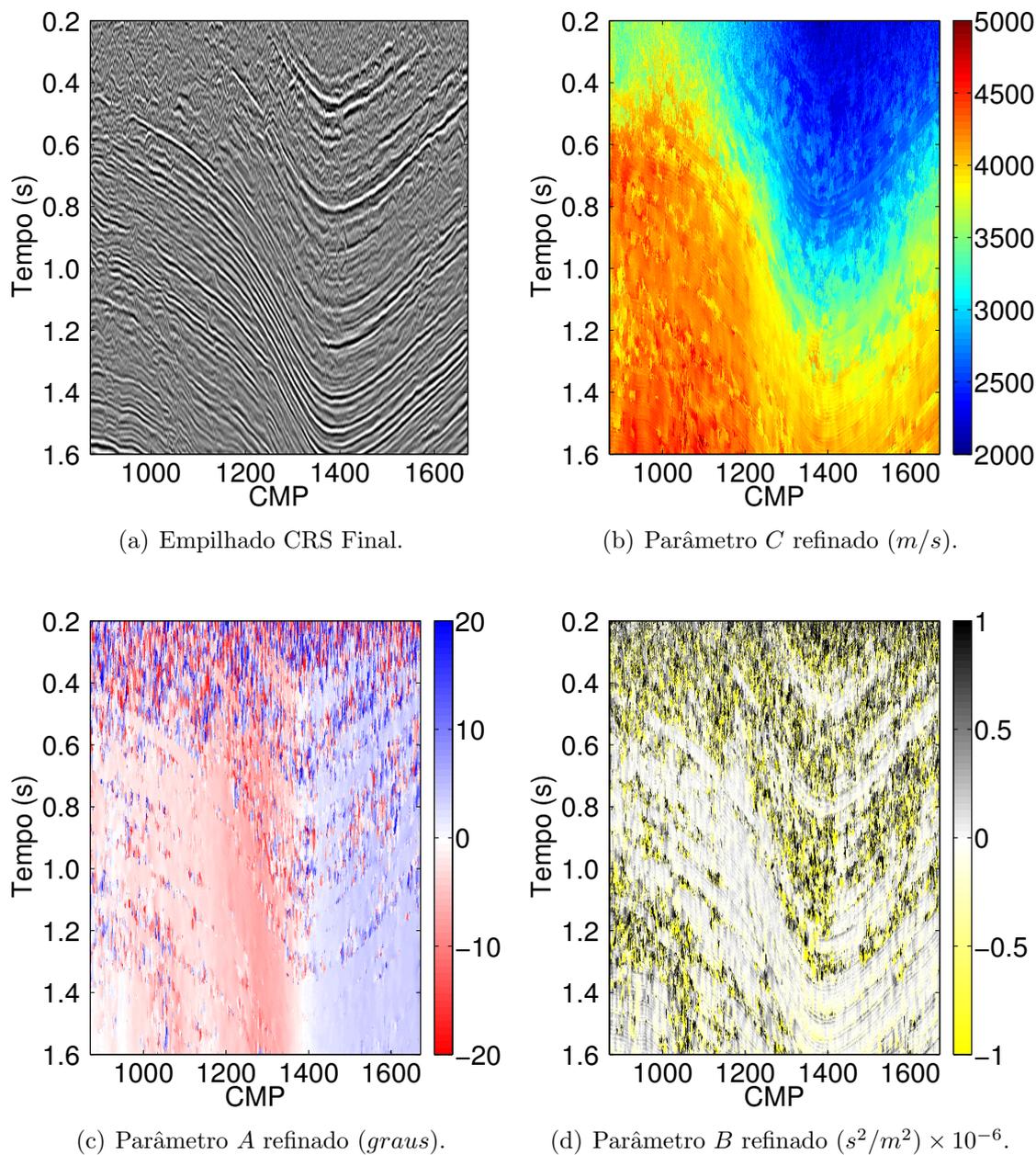


Figura 2.14: Resultados finais (parâmetros refinados) obtidos utilizando a estratégia de estimação híbrida (Etapa 8) de parâmetros CRS com aberturas fixas em meio afastamentos e pontos médios de 1300 m e 230 m, respectivamente. Os parâmetros  $A$  e  $C$  foram convertidos em ângulos de emergência e velocidades (Equação 2.5).

---

estratégia híbrida também foi capaz de fornecer bons resultados, enquanto que a estratégia local forneceu resultados com baixo realce de eventos e maior presença de ruído, porém ainda superior ao resultado obtido pelo método CMP.

Quanto ao custo computacional despendido na obtenção desses resultados, este foi mensurado com base no número total de semblances computadas por amostra em cada estratégia. Porém, para facilitar sua comparação, os tempos de execução para cada estratégia também foram mensurados e podem ser observados na Tabela 2.1. Resumidamente, foram 61 segundos para aplicação do método CMP, 1106 segundos para a aplicação da estratégia local, 2657 segundos para a aplicação da estratégia híbrida e 8171 segundos para a aplicação da estratégia global.

Com base nessas informações podemos concluir que a estratégia de estimação híbrida representa a opção de melhor custo-benefício. Os motivos são os seguintes:

1. Seus resultados são muito similares aos obtidos pela estratégia de estimação global;
2. Sua aplicação tem um custo computacional significativamente menor do que o observado na estratégia de estimação global;
3. Permite maior controle sobre a estimação de parâmetros CRS através de etapas de controle de qualidade (QC). Tais etapas facilitam e agilizam a identificação e a correção problemas durante a aplicação do método CRS. Por exemplo: Para modificar o intervalo de estimação do parâmetro  $C$ , seriam necessários outros 8171 segundos para verificar o resultado na estratégia de estimação global. No caso da estratégia de estimação híbrida, seriam apenas 1655 segundos. Considerando-se o tempo total (estimação inicial do parâmetro  $C$  e sua correção), a diferença é expressiva, são 16342 segundos contra 3310 segundos.

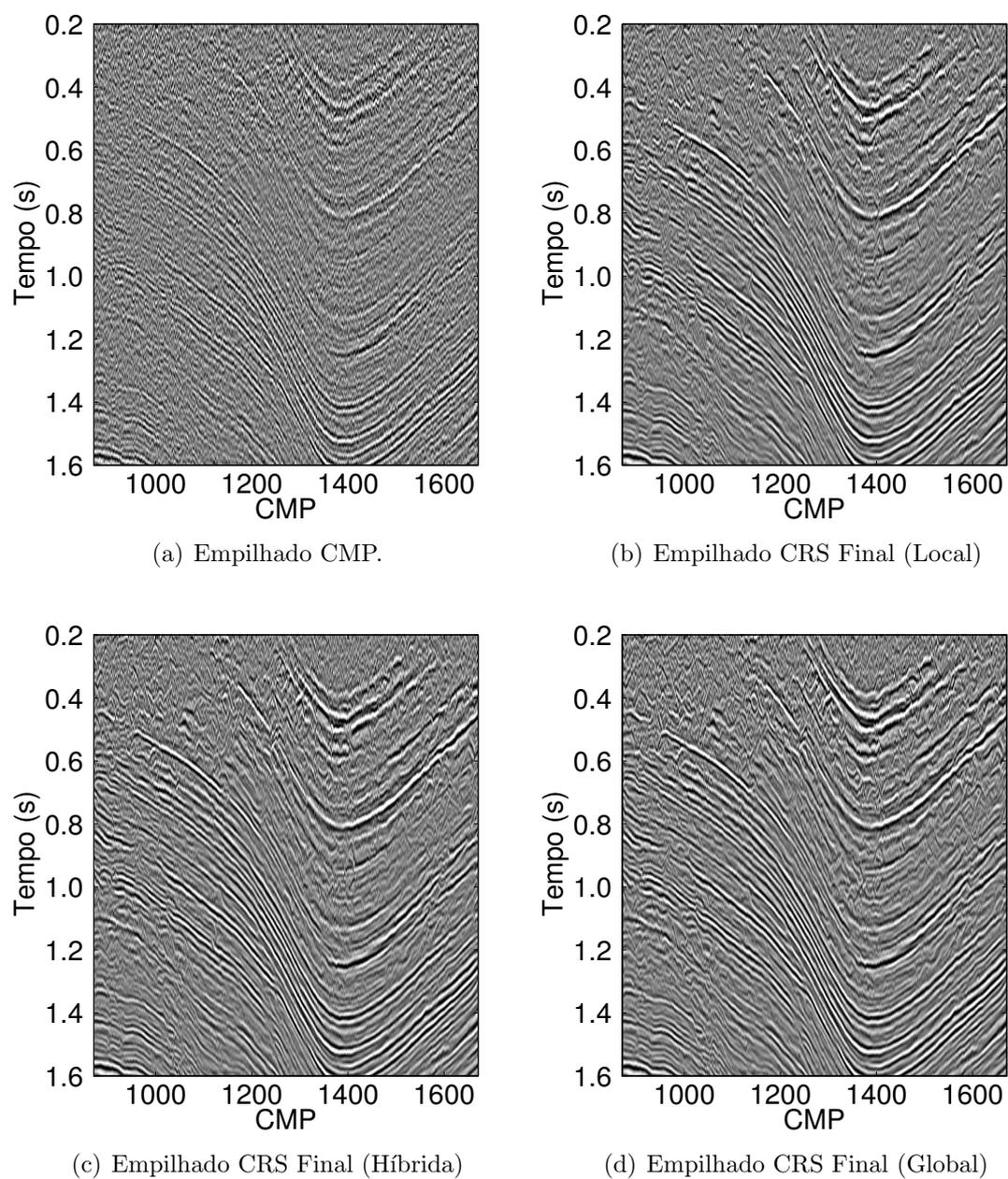


Figura 2.15: Comparação entre os dados empilhados (finais) obtidos pelo método CMP (a) e pelo método CRS através das estratégias de estimação local (b), híbrida (c) e global (d).

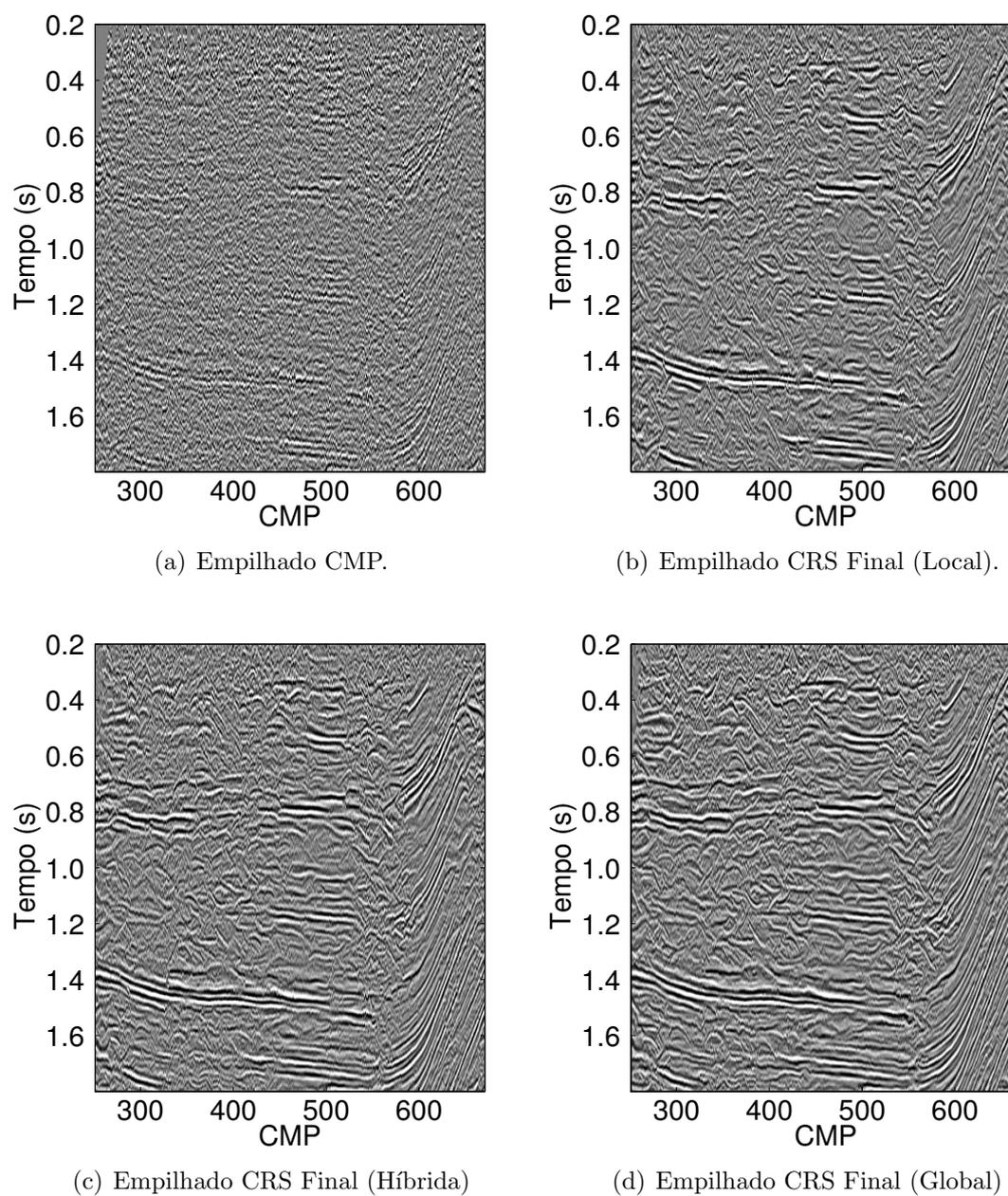


Figura 2.16: Comparação entre os dados empilhados (finais) obtidos pelo método CMP (a) e pelo método CRS através das estratégias de estimação local (b), híbrida (c) e global (d) para outra região do mesmo dado sísmico.

Tabela 2.1: Comparação dos parâmetros de execução do método CRS utilizando as estratégias global, híbrida e local para os exemplos apresentados na Seção 2.2.2. Em todos os experimentos, o mesmo *hardware* (apresentado no Apêndice A) e os mesmos conjuntos de parâmetros de abertura foram utilizados.

Estratégia de estimação	Método de estimação	Parâmetro estimado	Nº de traços	Nº de amostras	Nº de semblances por amostra	Nº total de semblances	Tempo de execução (s)
<b>Local</b>	Exaustivo	Param. $C$	12	1642496	251	4.12E+08	61
	Exaustivo	Param. $A$	7	1642496	251	4.12E+08	41
	Exaustivo	Param. $B$	19	1642496	451	7.41E+08	191
	Heurístico (DE)	Refino	172	1642496	225	3.70E+08	813
	-	<b>Total</b>	-	-	<b>1178</b>	<b>1.93E+09</b>	<b>1106</b>
<b>Híbrida</b>	Heurístico (DE)	Param. $A$ e $C$	67	1642496	1125	1.85E+09	1655
	Exaustivo	Param. $B$	19	1642496	451	7.41E+08	190
	Heurístico (DE)	Refino	172	1642496	225	3.70E+08	812
	-	<b>Total</b>	-	-	<b>1801</b>	<b>2.96E+09</b>	<b>2657</b>
<b>Global</b>	Heurístico (DE)	Param. $A$ , $B$ e $C$	172	1642496	<b>2250</b>	<b>3.70E+09</b>	<b>8171</b>

---

## 3 Aberturas de estimação e empilhamento

---

No Capítulo 2 o método CRS foi apresentado, assim como estratégias e métodos de estimação de parâmetros. Tais abordagens visam garantir a qualidade do resultado final, o dado empilhado CRS. No entanto, existe um outro aspecto a ser considerado: a determinação das aberturas de estimação e de empilhamento. Tais aberturas, ilustradas na Figura 2.2, são de fundamental importância e impactam diretamente na qualidade do empilhamento CRS, tanto no dado empilhado quanto nos parâmetros estimados.

Nesse trabalho, os valores considerados para as aberturas de estimação e de empilhamento serão idênticos em todos os exemplos. Dessa maneira, garantimos que as amplitudes consideradas para o empilhamento são as mesmas consideradas na estimação dos parâmetros CRS. Caso contrário, corre-se o risco de comprometer a qualidade dos eventos no empilhamento devido a pequenas flutuações no ajuste da superfície de tempo de trânsito CRS com os eventos presentes no dado. Esses casos serão discutidos em detalhes a seguir para as aberturas nas direções de pontos médios e meio afastamentos.

### 3.1 Abertura na direção dos afastamentos

A seleção de aberturas na direção do meio afastamento é muito similar ao procedimento de silenciamento de traços, ou *muting*, necessário para aplicação do método CMP (Mayne, 1962). No caso do método CMP, o principal motivo para realizar o silenciamento é evitar o empilhamento de pulsos sísmicos comprometidos pelo estiramento NMO<sup>1</sup>, ou NMO *stretch*. Portanto, além de influenciar na relação sinal-ruído,

---

<sup>1</sup>O estiramento NMO é um fenômeno que ocorre como consequência do processo de horizontalização dos eventos de reflexão ao longo dos afastamentos a partir de um modelo de velocidades. Por considerar um tempo de trânsito hiperbólico, essas curvas de tempo de trânsito se adensam nas proximidades da assíntota, definida pela velocidade NMO. Uma vez que esse fenômeno está

---

devido à quantidade de traços considerados na construção de cada amostra de tempo do dado empilhado, as aberturas em meio afastamentos impactam na resolução temporal desse dado, uma vez que estas podem empilhar dados estirados.

O estiramento NMO pode ser controlado, mesmo no caso do método CMP, permitindo que a velocidade NMO varie ao longo do pulso sísmico (Perroud e Tygel, 2004). Como o método CRS realiza estimações para cada amostra de tempo, essa variação na velocidade NMO é considerada automaticamente e o estiramento é minimizado. Com essa limitação resolvida, em princípio, seria possível considerar todos os traços disponíveis para estimar parâmetros e empilhar o dado sísmico. No entanto, outros fatores influenciam a qualidade do empilhamento, são eles: (1) Ajuste do tempo de trânsito com o evento de reflexão. Em geral, para afastamentos longos, os eventos deixam de apresentar características hiperbólicas e o ajuste entre o tempo de trânsito e o dado é comprometido. Nesse caso, o silenciamento de traços deve ocorrer na região onde essa aproximação é razoável; (2) Influência de ângulos críticos, que modificam a fase do pulso sísmico e comprometem o processo de soma construtiva para construção da amostra empilhada. Novamente, um silenciamento de traços deve ser realizado para desconsiderar as regiões do evento comprometidas pela mudança de fase do sinal; (3) Influência do cruzamento de eventos ao longo dos afastamentos. Dados que apresentam assíntotas muito próximas tendem a ficar sobrepostos em afastamentos longos, prejudicando também o processo de soma construtiva dos mesmos. O procedimento de silenciamento de traços deve ser realizado de modo a eliminar os três fatores descritos acima.

Sendo assim, para a aplicação do método CRS, as aberturas em meio afastamentos devem considerar critérios similares aos utilizados no método CMP. Tais aberturas podem incluir mais traços, porém estes ainda devem ser silenciados para evitar falta de ajuste e ângulos críticos.

---

associado às assíntotas da curva de tempo de trânsito, a intensidade do estiramento NMO é mais expressiva em tempos curtos e afastamentos longos.

## 3.2 Abertura na direção dos pontos médios

Diferentemente das aberturas na direção dos meio afastamentos, as aberturas em pontos médios não possuem análogos diretos no processamento pelo método CMP. Entretanto, seus objetivos são similares: silenciar traços que podem comprometer o ajuste da superfície de tempo de trânsito com o dado sísmico.

Como se trata de uma abertura em uma direção pouco usual, critérios como os apresentados na Seção 3.1 não estão bem estabelecidos. Na prática, diferentes aberturas em pontos médios são testadas e seus resultados avaliados por um intérprete. Caso essas aberturas sejam muito pequenas, os benefícios associados ao considerar uma vizinhança de CMPs não são relevantes e não condizem com o alto custo associado à estimação dos parâmetros CRS. No caso de aberturas muito grandes, eleva-se o custo de estimação de parâmetros CRS e estruturas muito menores que a abertura considerada serão suavizados. Portanto, detalhes estruturais seriam perdidos nesse processo.

### 3.2.1 Aberturas Semiautomáticas

Como discutido anteriormente, a determinação das aberturas em pontos médios impactam não somente na qualidade do resultado final, mas também no custo computacional para obtê-lo. Os critérios descritos são basicamente experimentais, ou seja, diversas aberturas são testadas e seus resultados analisados. Apesar de se tratar de um processo simples, testes de aberturas podem consumir uma grande quantidade de tempo, especialmente se o dado considerado apresenta muita diversidade estrutural, pois, nesse caso, cada região necessita de uma abertura diferente de modo a evitar suavização de estruturas em detrimento de outras.

A seguir, o problema de escolha de aberturas otimizadas para o empilhamento de reflexões será examinado e uma expressão matemática para esse fim será deduzida com base na Zona Projetada de Fresnel (ZPF).

Introduzida em Schleicher et al. (1997), a Primeira Zona de Fresnel (PZF), para o caso ZO, é dada por

$$|t_{ref} - t_{dif}| \leq \frac{w}{2}, \quad (3.1)$$

onde  $w$  representa a largura do pulso,  $t_{ref}$  e  $t_{dif}$  representam os tempos de trânsito de reflexões e difrações, respectivamente. Devido a sua própria definição, o tamanho da ZPF é pequeno para o caso de reflexões e grande (infinita) para o caso de difrações. Como apresentado em Facciopieri et al. (2013) e Asgedom et al. (2013), o uso de aberturas grandes em pontos médios, combinadas com modificações em tempos de trânsito, foram capazes de empilhar difrações. No entanto, nenhum desses trabalhos define especificamente o que pode ser considerado como abertura pequena ou grande.

Para determinar uma expressão dependente de parâmetros CRS para as aberturas em pontos médios, a partir da Inequação 3.1, consideremos os tempos de trânsito parabólicos

$$t(m, h) = t_0 + A(m - m_0) + \frac{1}{2t_0} [B(m - m_0)^2 + Ch^2]. \quad (3.2)$$

e

$$t(m, h) = t_0 + A(m - m_0) + \frac{1}{2t_0} C [(m - m_0)^2 + h^2]. \quad (3.3)$$

como aproximações para os termos  $t_{ref}$  e  $t_{dif}$  da Inequação 3.1. Substituindo e resolvendo para  $(m - m_0)$ , temos

$$|m - m_0| \leq \sqrt{\frac{wt_0}{|B - C|}}, \quad (3.4)$$

que relaciona a abertura em pontos médios com a largura do pulso,  $w$ , o tempo do raio normal,  $t_0$  e os parâmetros CRS  $B$  e  $C$ .

A princípio, a Inequação 3.4 fornece uma abertura teórica na direção dos pontos médios para o empilhamento CRS, uma vez conhecidos  $B$  e  $C$ . No entanto, a estimação do parâmetro  $B$  pode fornecer resultados instáveis, muito dependentes da abertura, e por consequência, pouco confiáveis. De modo a considerar essa instabilidade e preservar ao máximo as discontinuidades e pequenos detalhes presentes nos refletores, seria interessante que essa abertura pudesse ser a menor possível. Em outras palavras, nosso objetivo é determinar a abertura em pontos médios na qual a influência do parâmetro  $B$  seja desprezível. Nesse caso, a Equação 2.10 da su-

perfície de tempo trânsito CRS para difrações, que não depende do parâmetro  $B$ , será considerada.

Para isso, introduziremos duas suposições heurísticas: (1)  $|B| \leq |C|$  em um evento de reflexão; (2) Um valor inicial para o parâmetro  $C$  é conhecido. Nesse caso, a abertura mínima pode ser considerada como o caso em que  $B = -C$ , que fornece

$$|m - m_0| \leq \sqrt{\frac{wt_0}{2C}}. \quad (3.5)$$

Essa inequação pode ser reescrita em termos das velocidades NMO, usando a Equação 2.5, a qual fornece

$$|m - m_0| \leq \frac{v_{NMO}}{2} \sqrt{\frac{wt_0}{2}}. \quad (3.6)$$

Por se tratar de uma abertura teórica que pode ser computada em cada ponto do dado ZO, os valores fornecidos pela Equação 3.6 podem ser ligeiramente menores ou maiores que os adequados, dependendo de características do dado sísmico. Nesse caso, é introduzido um fator de escala  $\alpha$  que pode variar na vizinhança de 1, podendo este ser controlado por um intérprete, resultando em

$$\delta^{(m)} = \alpha \frac{v_{NMO}}{2} \sqrt{\frac{wt_0}{2}}. \quad (3.7)$$

A Equação 3.7 representa a abertura em pontos médios semiautomática proposta nesse trabalho. Sua dedução para o caso 3D pode ser encontrada em Facciopieri et al. (2016). A diferença entre a ZPF original e a abertura semiautomática,  $\delta^{(m)}$  é ilustrada na Figura 3.1. Note que mesmo no pior caso, o de  $B = -C$ , a região definida pela abertura  $\delta^{(m)}$  ainda se ajusta ao evento de reflexão.

A abertura proposta foi validada com experimentos, utilizando a superfície de tempo de trânsito CRS (Equação 2.4) e sua versão para difrações (Equação 2.10), com dados reais e sintéticos. Como esperado, os resultados obtidos em ambos os casos não apresentaram diferenças significativas, pois ambos foram estimados e empilhados com uma abertura onde os valores do parâmetro  $B$  não influenciam o resultado. A Figura 3.2 ilustra um desses resultados para traços empilhados de um dado real marinho (mais detalhes sobre esse dado sísmico podem ser encontrados no Apêndice

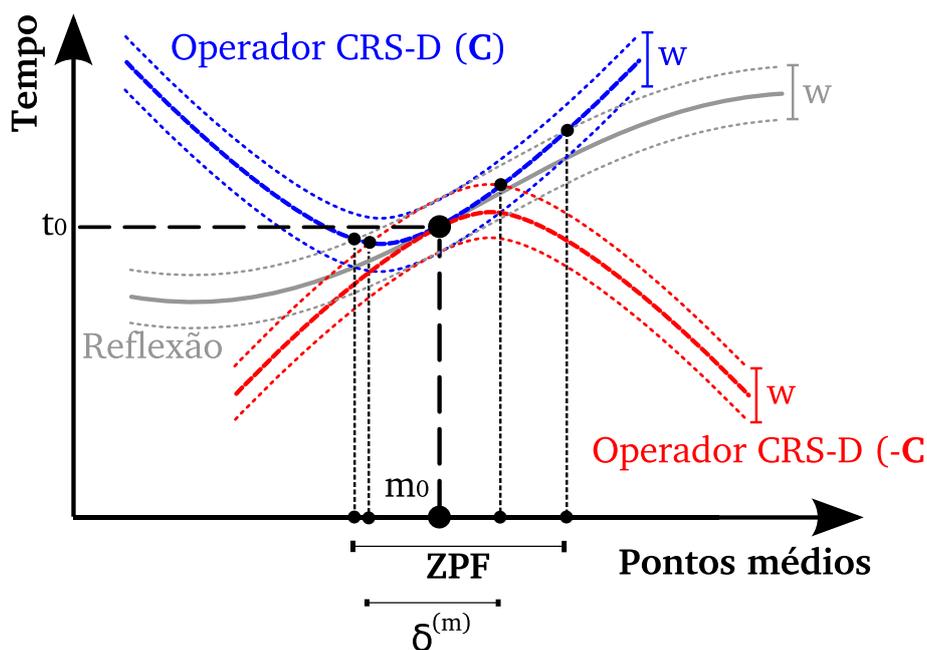
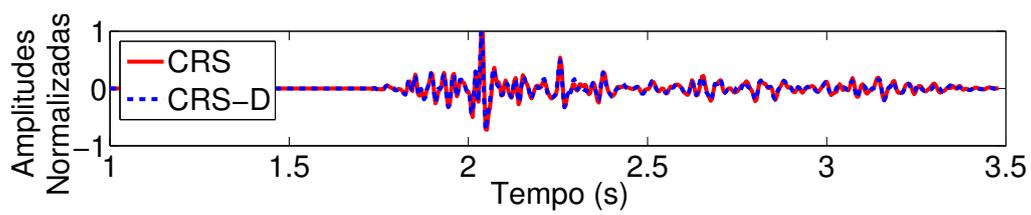


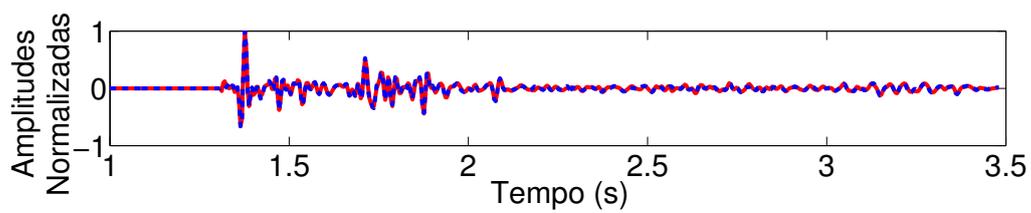
Figura 3.1: Zona projetada de Fresnel para um evento de reflexão ZO com largura de pulso  $w$  na posição  $(m_0, t_0)$ . Note que a região delimitada pela abertura proposta,  $\delta^{(m)}$ , se ajusta bem ao evento de reflexão seja qual for o valor do parâmetro  $B$ .

A). Nesse exemplo, é possível verificar que ambos os traços se ajustam quase que perfeitamente, indicando que não houve diferença entre os resultados obtidos para os dois tempos de trânsito. Ou seja, para abertura em pontos médios proposta, estimar o parâmetro  $B$  e considerá-lo igual ao parâmetro  $C$  não altera o resultado.

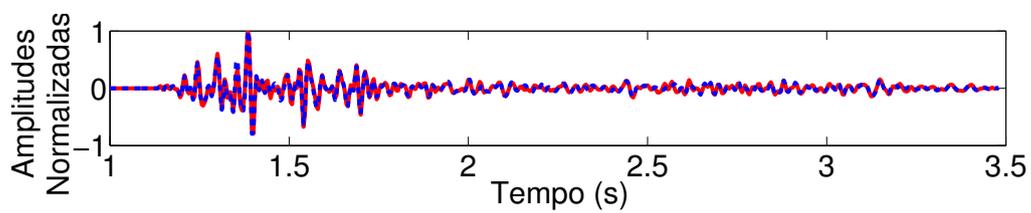
Outro aspecto interessante observado na aplicação dessa abertura em pontos médios é que valores maiores que os fornecidos pela inequação 3.6 já sofreram com processos de suavização, e valores menores não apresentaram ganhos significativos em relação ao processamento convencional CMP. Um exemplo com tais resultados é apresentado na Figura 3.3, onde diferentes valores para o fator de escala  $\alpha$  foram utilizados para estimar os parâmetros e empilhar o dado sísmico. Sendo assim, a abertura descrita pela Equação 3.6 pode ser considerada como valor inicial para as aberturas em pontos médios na sequência de processamento pelo método CRS.



(a) CDP 1250.



(b) CDP 1000



(c) CDP 750

Figura 3.2: Comparação entre três traços empilhados obtidos pelo método CRS e pelo método CRS para difrações para um dado real marinho utilizando a abertura proposta na Equação 3.7 com  $\alpha = 1$ .

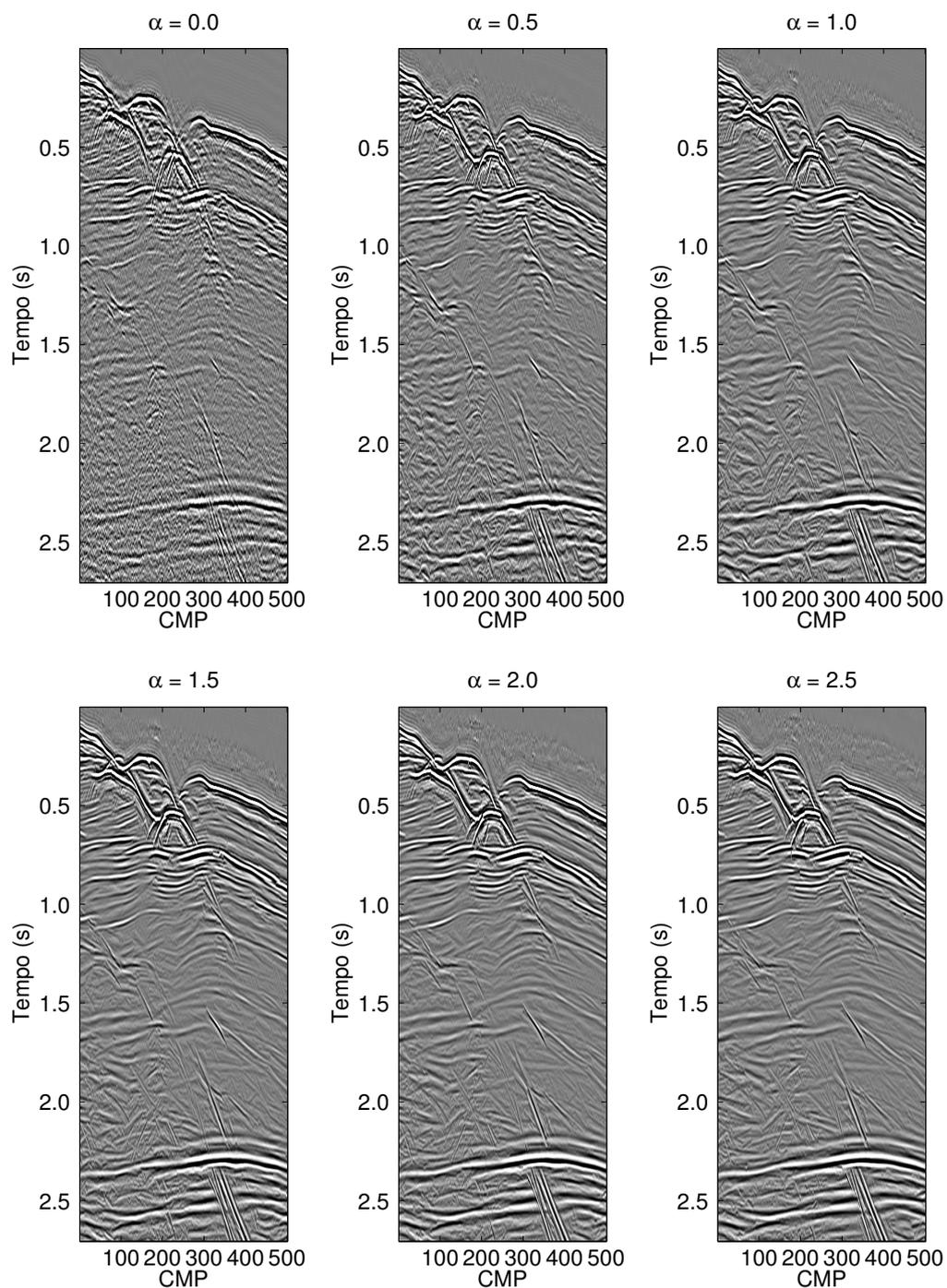


Figura 3.3: Comparação entre dados empilhados obtidos modificando-se apenas o fator de escala  $\alpha$  (Equação 3.7) entre 0.0 e 2.5 para a estimação dos parâmetros CRS e para o empilhamento. Note que quanto maior o seu valor, mais suavizados ficam os eventos de reflexão, comprometendo os pequenos detalhes presentes na imagem.

---

## 4 Método CRS iterativo-iterativo

---

Nos Capítulos 2 e 3 o método CRS de empilhamento de dados sísmicos foi introduzido e os principais aspectos práticos de sua aplicação foram discutidos juntamente com suas principais vantagens e desvantagens. Nos casos apresentados, a estimação dos parâmetros CRS era realizada em todos os pontos do dado, podendo esta ser exaustiva, isto é, quando são avaliados todos os possíveis conjuntos de parâmetros, ou através de heurísticas, que utilizam critérios arbitrários para explorar o espaço de estimação, avaliando uma porção menor do conjunto de parâmetros possíveis.

Nesse momento, dadas as considerações realizadas no Capítulo 2, fica evidente que estratégias globais fornecem resultados de melhor qualidade e que cada passo envolvido no processamento CRS deve ser cuidadosamente avaliado por um intérprete em etapas de controle de qualidade ou QC (do inglês, *Quality Control*), de modo a garantir que os parâmetros estimados e as aberturas consideradas sejam adequados. Essas etapas de QC podem ser divididas em dois grupos: (1) Controle de qualidade dos parâmetros, que envolve a escolha dos intervalos de estimação de parâmetros, a discretização das buscas e a validação dos valores obtidos após a estimação dos mesmos; (2) Controle de qualidade das aberturas e janelas de tempo, no qual se determina a região a ser considerada para estimação dos parâmetros tanto espacialmente (aberturas nas direções dos afastamentos e pontos médios) quanto em tempo (janelas de coerência).

Outro aspecto notório é que mesmo a estratégia global não foi capaz de fornecer parâmetros (especialmente  $A$  e  $B$ ) e resultados satisfatórios em regiões com eventos mais fracos. Nessas regiões, em geral, são estimados valores espúrios, sem a menor conexão com a tendência observada na sua vizinhança. Os resultados observados no Capítulo 2 ilustraram esse aspecto negativo associado ao uso de processos automáticos de estimação de parâmetros (abordagem *data-driven*). Idealmente, essas estimações automatizadas deveriam ser assistidas de modo que estas ficassem restritas a valores esperados. Exemplo disso, são os resultados obtidos para o parâmetro  $C$ , para o qual uma guia de velocidade NMO foi utilizada em todas as estratégias apresentadas

(Global, Híbrida e Local). Dessa maneira, os valores estimados para o parâmetro  $C$  preservaram a tendência esperada e imposta pelo modelo de velocidade NMO utilizado. No entanto, apenas a construção de modelos de velocidade faz parte das práticas usuais de processamento de dados sísmicos. O mesmo não pode ser dito sobre modelos ou guias para os parâmetros  $A$  (relacionados aos ângulos de emergência do raio normal) e  $B$  (relacionado à curvatura da frente de onda normal).

De modo a introduzir a construção de tais guias, será proposto um fluxo de trabalho interativo e iterativo para aplicação do método CRS (Faccipieri et al., 2015). Em cada iteração, estimações globais e exaustivas de parâmetros são realizadas, porém, restritas a um pequeno conjunto de pontos, cirurgicamente selecionados por um intérprete, que compreende a parte interativa desse fluxo. Fora dos pontos selecionados, guias de parâmetros CRS serão construídas através de processos de interpolação.

Essas guias de parâmetros CRS, agora definidas para todas as amostras de tempo e pontos médios, podem ser consideradas como uma tendência de baixa resolução desses parâmetros. Utilizando essas guias, processos de refinamento globais de parâmetros podem ser empregados, permitindo que apenas pequenos desvios dessas guias sejam tolerados, de modo a maximizar o ajuste dos mesmos com o dado sísmico, mesmo em situações desfavoráveis. Depois disso, o dado sísmico pode ser empilhado utilizando a superfície de tempo de trânsito CRS e o resultado obtido pode ser utilizado em uma nova iteração, em que mais pontos são selecionados. Esse processo é repetido, adicionando, subtraindo ou editando-se os pontos selecionados, até que o resultado desejado seja alcançado ou que as diferenças entre iterações sejam desprezíveis.

As principais vantagens desse fluxo de trabalho são:

1. Maior controle sobre os parâmetros CRS estimados através do uso de guias e etapas de controle de qualidade (QC);
2. Redução significativa do número de estimações de parâmetros. O método de estimação por busca exaustiva seria utilizado em um pequeno conjunto de pontos e, uma vez que guias são utilizadas (reduzindo o intervalo de estimação de parâmetros), o processo de refinamento global necessita de um menor número de iterações para convergir;

3. Aumento significativo da qualidade dos dados empilhados CRS obtidos;
4. Redução dos artefatos associados aos valores espúrios estimados pelos métodos automáticos, as conhecidas “minhocas”.

## 4.1 Estratégia de estimação interativa-iterativa

A Figura 4.1 apresenta uma visão geral simplificada do fluxo de processamento iterativo e interativo proposto. Cada etapa do fluxo foi numerada e será discutida em detalhes a seguir:

– **Etapa 1 (Dados de entrada):**

Assim como nas estratégias de estimação de parâmetros CRS convencionais, temos como dados de entrada um dado sísmico pré-empilhamento em que supõe-se que todas as etapas de pré-processamento foram aplicadas. Além disso, nesse caso serão necessários mais dois dados: (a) O dado empilhado CMP, que será utilizado para ajudar o intérprete a identificar regiões de interesse que forneceriam os parâmetros CRS mais confiáveis; (b) O modelo de velocidades NMO utilizado para construir o dado empilhado CMP. Pode-se supor que ambos são conhecidos a priori, uma vez que fazem parte do fluxo de processamento padrão para qualquer dado sísmico de reflexão.

– **Etapa 2 (Seleção de pontos):**

Seleção manual de pontos, ou *picking*, ao longo dos eventos de reflexão do dado empilhado CMP. Esses pontos devem seguir apenas os eventos ou horizontes mais relevantes, evitando todas as regiões onde estes não estão bem definidos ou que apresentem baixa relação sinal-ruído. O objetivo é garantir que apenas as regiões bem definidas contribuirão para a construção das guias de parâmetros.

É importante mencionar que, mesmo em casos em que apenas uma pequena porção do dado empilhado está bem definida, o que nos leva a uma pequena quantidade de pontos possíveis, essa estratégia é capaz de fornecer bons resultados depois de um determinado número de iterações. A quantidade de pontos

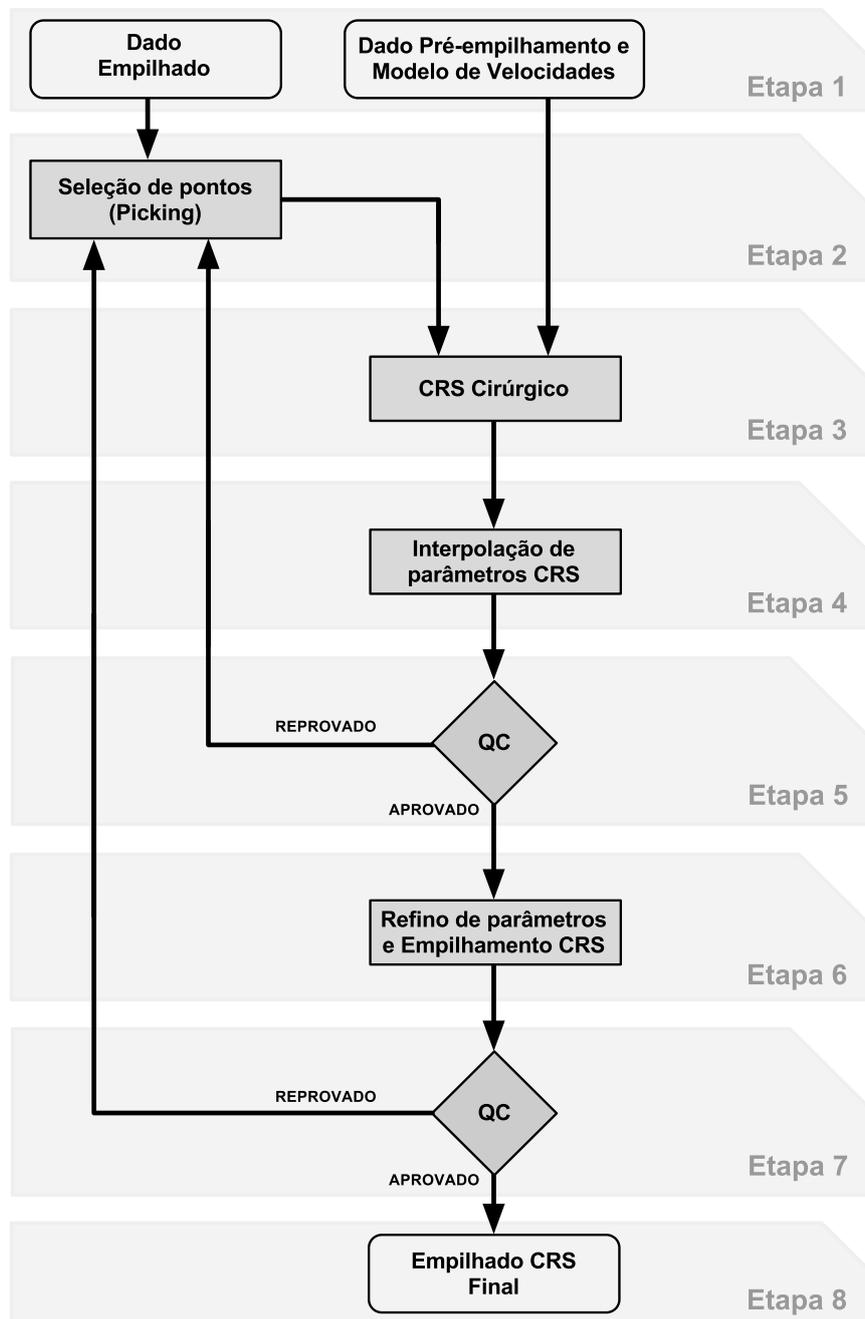


Figura 4.1: Fluxo simplificado de processamento CRS pela abordagem iterativa-iterativa com estimação global de parâmetros.

---

não é crucial, o importante é selecionar um conjunto de pontos capaz de capturar as tendências de variação dos parâmetros CRS no dado sísmico.

– **Etapa 3 (CRS Cirúrgico):**

Para cada ponto selecionado, ou *pick*, uma estimação global de parâmetros CRS é realizada usando a velocidade NMO como guia inicial, isto é, o intervalo de estimação para a velocidade será um percentual da velocidade guia. Nessa etapa, além de considerar uma estimação global, será considerada uma busca exaustiva como método de estimação do melhor trio de parâmetros CRS.

Vale notar que aplicar a busca exaustiva para estimar os três parâmetros CRS utilizando uma estratégia de estimação global em todos os pontos de um dado sísmico é proibitivo. Porém, somente os pontos selecionados pelo intérprete são considerados para essa busca, que representam uma pequena fração do número total de pontos do dado. Desse modo, garantimos que os melhores trios de parâmetros CRS, segundo critérios de coerência, serão estimados em tempo hábil e utilizados na construção das guias.

Finalmente, para determinar as aberturas de estimação em meio afastamentos e pontos médios, as práticas descritas no Capítulo 3 podem ser considerados, incluindo as aberturas semiautomáticas na direção dos pontos médios.

– **Etapa 4 (Interpolação de parâmetros CRS):**

Uma vez que os parâmetros CRS foram estimados para cada ponto selecionado, um processo de interpolação se faz necessário, de modo a preencher os painéis de parâmetros e construir as referidas guias. Essa interpolação deve ser consistente com os eventos de reflexão selecionados, de modo a garantir que a tendência observada/esperada seja preservada. Para isso, os pontos selecionados devem ser agrupados por eventos, ou horizontes. Por exemplo: Em um dado empilhado em que se observam três refletores ou horizontes distintos, um índice deve ser atribuído a cada horizonte e salvo juntamente com a posição dos pontos pertencentes àquele horizonte. Essa informação será relevante mais adiante, na discussão sobre os processos de interpolação utilizados.

---

Nessa estratégia, apenas os parâmetros  $A$  e  $B$  serão considerados para construção de guias. Para o parâmetro  $C$ , o modelo de velocidade NMO será considerado como guia em todas as iterações.

– **Etapa 5 (Controle de qualidade):**

De modo a evitar guias de parâmetros com informações geologicamente incorretas ou que fujam da tendência esperada para uma determinada região, um processo de controle de qualidade (ou QC, do inglês *Quality Control*) deve ser realizado. Apesar da seleção de pontos ter considerada apenas regiões onde os eventos são bem definidos no dado empilhado CMP, alguns pontos ainda podem apresentar parâmetros contaminados por ruído e divergirem da tendência local. Nesses casos, a guia de parâmetros fica comprometida. Porém, comparações visuais entre o dado empilhado CMP e a guia são suficientes para identificar a presença desses tipos de inconsistências. Caso haja necessidade, os pontos contaminados por ruído devem ser desconsiderados e/ou novos pontos podem ser selecionados. Em ambos os casos, novas etapas de estimação e interpolação serão necessárias.

– **Etapa 6 (Refino dos parâmetros CRS):**

Um refino global dos parâmetros CRS é realizado para todas as amostras de tempo e posições de pontos médios, utilizando o algoritmo genético *Differential Evolution*. Nesse caso, para os intervalos de estimação, são considerados pequenos desvios das guias obtidas anteriormente. Novamente, o máximo de coerência é selecionado, as guias refinadas são salvas e o dado é empilhado.

– **Etapa 7 (Controle de qualidade):**

Uma nova etapa de controle de qualidade é considerada, onde o dado empilhado CMP (dado de entrada) e o dado empilhado CRS obtido no último passo são comparados. Experimentos mostraram que depois da primeira iteração, o empilhado CRS apresenta eventos mais definidos e em alguns casos, novos eventos são observados. Nesses casos, uma nova iteração deve ser realizada, conside-

rando novos *picks* ao longo desses novos eventos e, caso necessário, correção de *picks* anteriores.

– **Etapa 8 (Empilhamento CRS final):**

Depois de um determinado número de iterações, o empilhado CRS final e seus parâmetros são obtidos. Um critério de parada pode ser considerado quando a diferença entre iterações deixar de ser perceptível.

### 4.1.1 Interpolação de parâmetros CRS

Para construir as guias mencionadas anteriormente para os parâmetros  $A$  e  $B$ , um esquema de interpolação foi desenvolvido e consiste em duas etapas. A primeira delas interpola os valores do parâmetro  $A$  entre pontos de um mesmo evento de reflexão ou horizonte e a segunda interpola esses valores entre esses horizontes. Note que apenas a guia do parâmetro  $A$  é construída dessa forma, a guia para o parâmetro  $B$  é obtida simplesmente derivando a guia do parâmetro  $A$  na direção dos pontos médios e multiplicando-se por  $t_0$  (Equação 2.5). A seguir ambas as interpolações serão apresentadas:

**Interpolação ao longo de um horizonte:** Utilizando os índices de horizontes criados para identificar a qual horizonte um ponto pertence, pontos de um mesmo horizonte devem ser conectados via interpolação, assim como seus valores. Para essa finalidade, as seguintes técnicas de interpolação foram experimentadas:

- *Interpolação linear:* Nesse caso, os valores estimados para o parâmetro  $A$  em cada ponto de um mesmo horizonte foram interpolados linearmente e as guias de parâmetros construídas (como será apresentado a seguir). Os resultados obtidos dessa maneira apresentavam resultados satisfatórios, porém, apenas quando um grande número de pontos era selecionado ao longo dos horizontes (ou eventos de reflexão). Sendo assim, essa técnica de interpolação foi descartada, pois esta seria capaz de fornecer resultados apenas em dados em que os eventos fossem bem definidos em toda sua extensão.

- *Interpolação quadrática*: Esse caso foi logo descartado devido ao fato de que necessita de três pontos ao longo do horizonte para realizar a interpolação. Essa condição se traduz em uma imposição muito forte a respeito da forma do horizonte, pois só permite pontos de inflexão a cada três pontos do horizonte.
- *Interpolação cúbica*: Técnica de interpolação que forneceu os melhores resultados, pois permite que se interpole pontos dois-a-dois, que exista um ponto de inflexão entre os pontos selecionados e que a informação estimada do parâmetro  $A$  (primeira derivada na direção dos pontos médios) seja utilizada no processo e preservada em cada ponto considerado.

Com base nos experimentos descritos acima, a técnica de interpolação cúbica foi escolhida para interpolar os pontos ao longo de um horizonte e esta é executada da seguinte maneira: Seja uma função cúbica, representada pela forma geral

$$y(x) = ax^3 + bx^2 + cx + d, \quad (4.1)$$

com coeficientes  $a$ ,  $b$ ,  $c$  e  $d$ . Dados dois pontos,  $p_1 = (x_1, y(x_1))$  e  $p_2 = (x_2, y(x_2))$ , e suas derivadas,  $y'(x_1)$  e  $y'(x_2)$ , podemos construir o seguinte sistema de equações

$$\begin{aligned} y(x_1) &= ax_1^3 + bx_1^2 + cx_1 + d \\ y(x_2) &= ax_2^3 + bx_2^2 + cx_2 + d \\ y'(x_1) &= 3ax_1^2 + 2bx_1 + c \\ y'(x_2) &= 3ax_2^2 + 2bx_2 + c \end{aligned}, \quad (4.2)$$

o qual, pode ser reescrito em forma matricial como

$$\begin{bmatrix} x_1^3 & x_1^2 & x_1 & 1 \\ x_2^3 & x_2^2 & x_2 & 1 \\ 3x_1^2 & 2x_1 & 1 & 0 \\ 3x_2^2 & 2x_2 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y(x_1) \\ y(x_2) \\ y'(x_1) \\ y'(x_2) \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

Resolvendo o sistema de equações acima, os coeficientes  $a$ ,  $b$ ,  $c$  e  $d$  que definem a cúbica que passa entre os dois pontos de um horizonte cujas as derivadas são dadas

pelo parâmetro  $A$  serão determinados unicamente. Esse processo é repetido para cada par de pontos ao longo de um horizonte. Além disso, como a equação que conecta esses pontos é conhecida, as derivadas entre esses pontos podem ser determinada e novos pontos, auxiliares, podem ser construídos entre os pontos selecionados ao longo desse mesmo horizonte. Esses pontos auxiliares são importantes para a etapa seguinte de interpolação entre horizontes e também são muito úteis nas etapas de controle de qualidade, pois estes devem se ajustar ao evento de reflexão considerado na seleção de pontos inicial.

**Interpolação entre horizontes:** Os horizontes interpolados, constituídos pelos pontos selecionados manualmente e pelos pontos auxiliares, agora podem ser interpolados entre si. Para isso, será utilizada uma interpolação linear sobre as arestas de triângulos que conectam os pontos dos horizontes. Esses triângulos são construídos através de um processo conhecido como Triangulação de DeLauney (Hjelle e Daehlen, 2006). Os valores do parâmetro  $A$  em cada ponto no interior desses triângulos são interpolados utilizando-se suas coordenadas baricêntricas (Coxeter, 1969).

Nessa etapa, os pontos auxiliares são de grande importância e tem como objetivo estabilizar esse processo de interpolação entre horizontes. No caso de considerarmos apenas os pontos selecionados manualmente pelo intérprete, por se tratarem de poucos pontos, os triângulos de DeLauney podem se conectar de modo que suas arestas atravessem outros horizontes. Nesse caso, as guias obtidas ficam comprometidas, pois valores de parâmetros  $A$  de regiões distantes são interpolados cruzando um horizonte que pode ter parâmetros significativamente diferentes.

Além dos pontos auxiliares, dois horizontes de controle são impostos, um no tempo zero e outro no tempo máximo do dado. Esses dois horizontes de controle possuem valores de parâmetros  $A$  e  $B$  iguais a zero e ajudam a extrapolar os valores das guias em suas bordas superior e inferior.

A Figura 4.2 apresenta uma visão geral dos processos de interpolação necessários a construção da guia de parâmetros  $A$ .

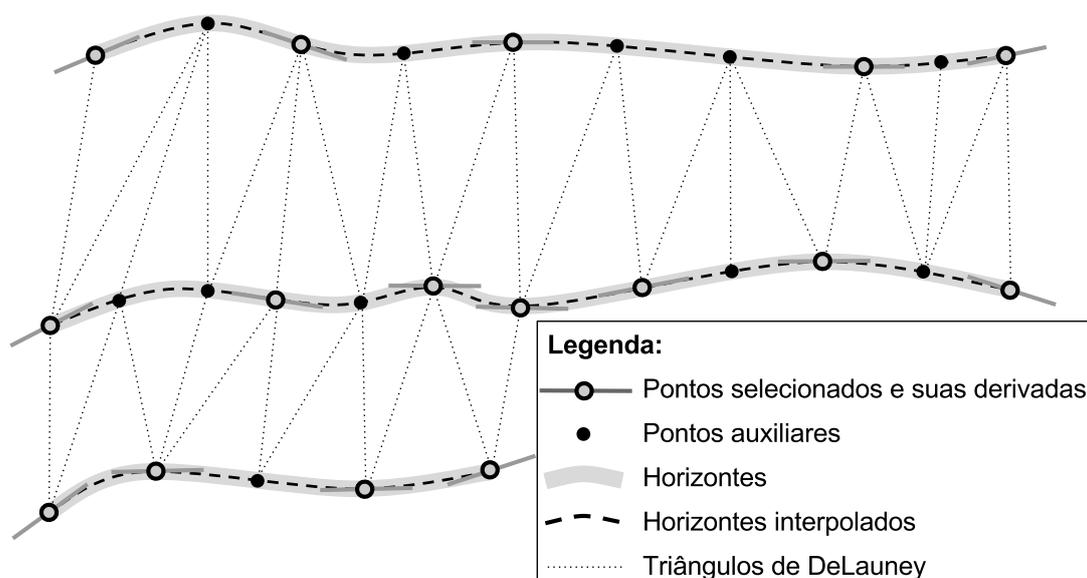


Figura 4.2: Ilustração representando a construção de uma guia de parâmetros  $A$ . A curva interpolada entre pontos do mesmo horizonte é representada pela linha tracejada, e a interpolação entre horizontes, pelas retas pontilhadas (Triângulos de DeLauney).

#### 4.1.2 Exemplo de aplicação: Dado sintético

Para ilustrar o processo de construção de guias, um dado sintético simples foi considerado (mais informações sobre esse dado podem ser encontradas no Apêndice A). O dado empilhado CRS e a guia do parâmetro  $A$  obtidos no dado com pouco ruído podem ser vistas na Figuras 4.3 e serão considerados como referência. Para simular um caso real, ruído branco foi adicionado ao dado de modo que apenas o primeiro evento e partes do segundo sejam visíveis no dado empilhado CMP. A partir desse dado, a estratégia de estimação iterativa-iterativa foi aplicada em quatro iterações, apresentadas nas Figuras 4.4 e 4.5.

Na primeira iteração, pontos foram selecionados apenas sobre os eventos plano horizontal e plano inclinado. A guia do parâmetro  $A$  foi construída com base nesses pontos e o resultado do seu refinamento pode ser visto nas Figuras 4.4(a) e 4.5(a). Observe que apenas as tendências dos dois eventos selecionados são observadas na guia. No dado empilhado com essa guia, parte do evento sinclinal foi empilhado coerentemente e foi selecionada para a próxima iteração, apresentada nas Figuras 4.4(b) e 4.5(b). Nas próximas duas iterações mais pontos foram selecionados ao longo do

evento sinclinal, Figuras 4.4(c) e (d) e Figuras 4.5(c) e (d). No final dessas quatro iterações, a guia do parâmetro  $A$  foi construída iterativamente e iterativamente, mesmo com poucas informações iniciais sobre as estruturas presentes no dado. Note que, ao final da quarta iteração, a guia do parâmetro  $A$  refinada começa a se aproximar da guia de referência, Figura 4.3 (b).

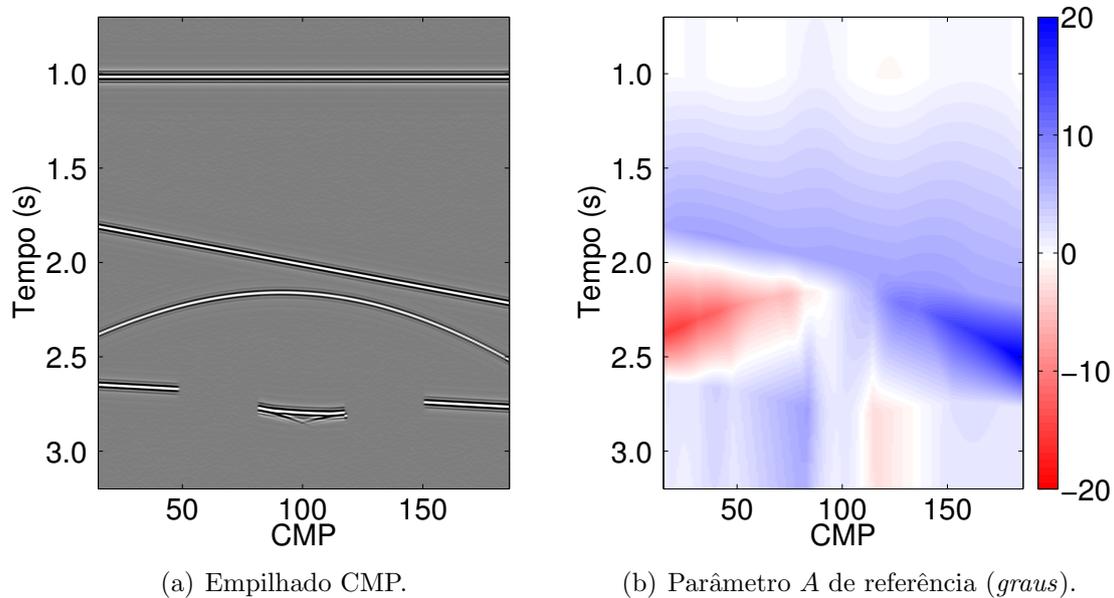
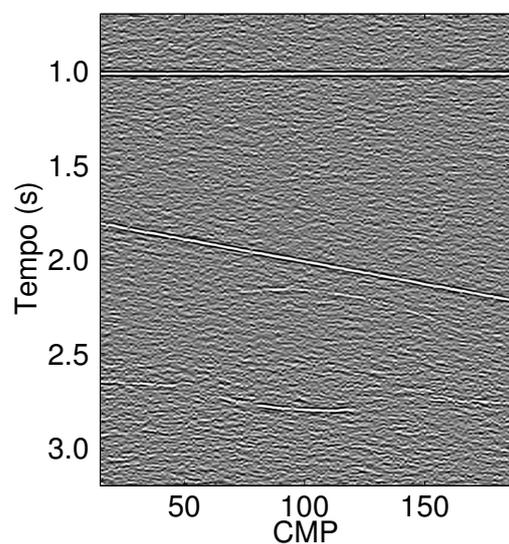
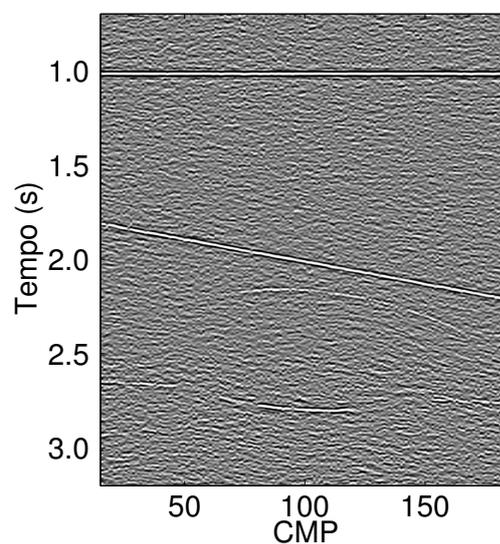


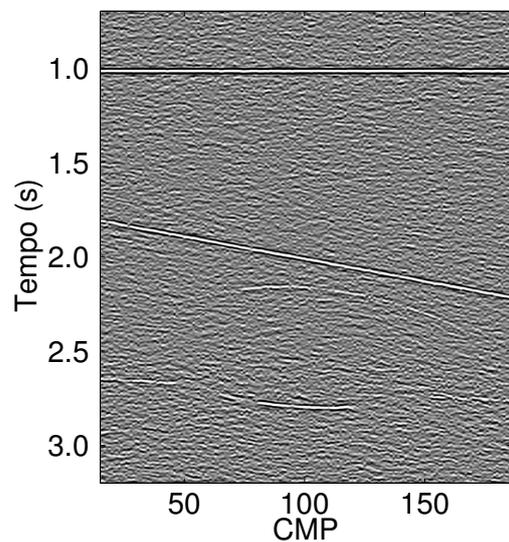
Figura 4.3: Dado sintético: Dado empilhado CMP e guia do parâmetro  $A$  construídos utilizando o dado pré-empilhado com pouco ruído. Tais resultados serão considerados apenas como referência.



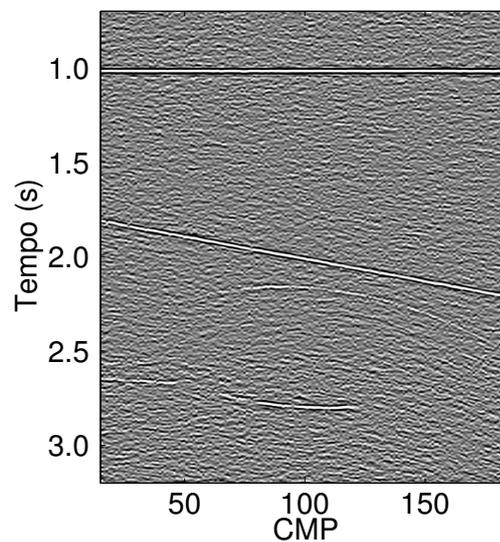
(a) Empilhado CRS: Primeira iteração.



(b) Empilhado CRS: Segunda iteração.

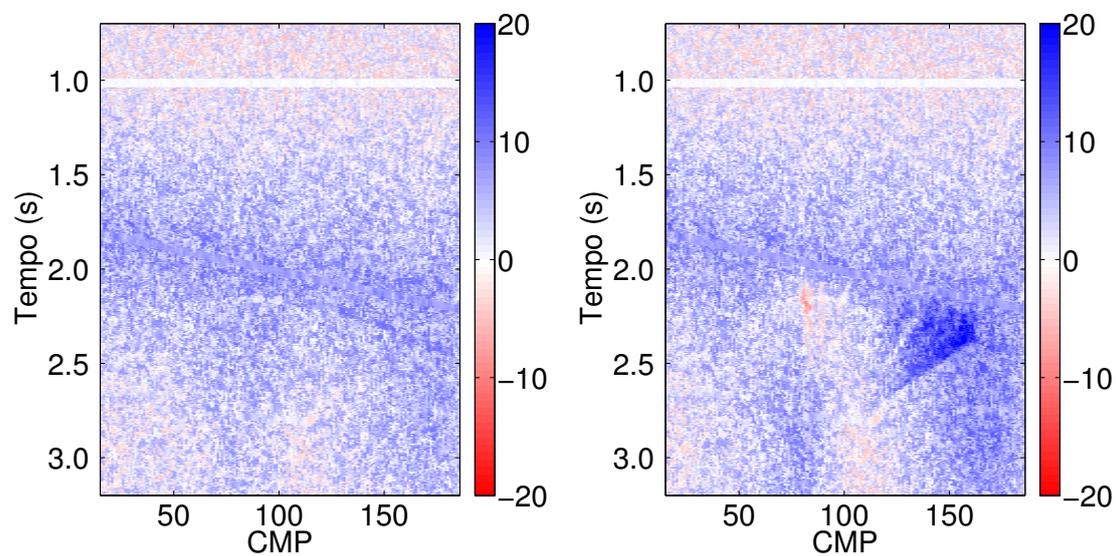


(c) Empilhado CRS: Terceira iteração.

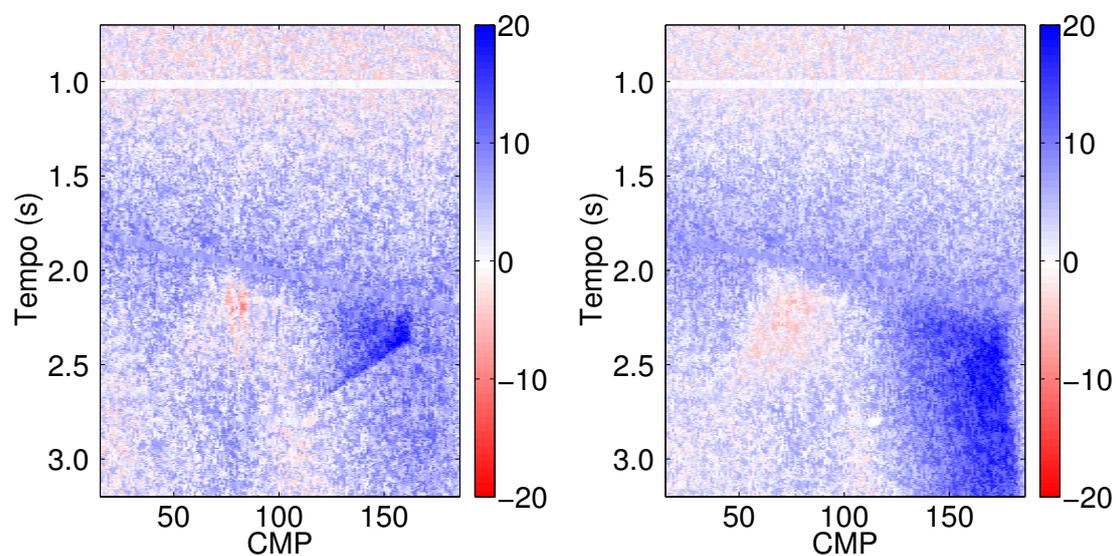


(d) Empilhado CRS: Quarta iteração.

Figura 4.4: Dado sintético: Dado empilhado CRS obtido na (a) primeira, (b) segunda, (c) terceira e (d) quarta iteração da estratégia de estimação iterativa-iterativa.



(a) Parâmetro  $A$ : Primeira iteração (*graus*). (b) Parâmetro  $A$ : Segunda iteração (*graus*).



(c) Parâmetro  $A$ : Terceira iteração (*graus*). (d) Parâmetro  $A$ : Quarta iteração (*graus*).

Figura 4.5: Dado sintético: Refinamento da guia do parâmetro  $A$  obtida na (a) primeira, (b) segunda, (c) terceira e (d) quarta iteração da estratégia de estimação iterativa-iterativa.

## 5 Resultados

Neste capítulo serão apresentados resultados obtidos na aplicação da estratégia de processamento CRS interativa-iterativa juntamente com as aberturas semiautomáticas, ambas propostas nesse trabalho. Os resultados serão apresentados na mesma ordem em que são obtidos, seguindo o fluxograma da Figura 4.1, de modo a ilustrar o mais fielmente possível o fluxo de trabalho proposto.

### 5.1 Dado Real: Tacutu

Para demonstrar a aplicação das estratégias propostas nesse trabalho em uma situação real, um dado da Bacia do Tacutu, situada na região nordeste de Roraima, foi considerado. Esse dado, linha 50-RL-90, foi adquirido em 1982 e tem como característica mais marcante sua baixa cobertura (*fold*), de apenas 12 traços. A Figura 5.1 apresenta a localização geográfica da linha considerada e a Tabela 5.1 contém seus parâmetros de aquisição e suas principais características.

Tabela 5.1: Dado Tacutu: Parâmetros de aquisição do dado sísmico de multicobertura.

Número de tiros	188
Intervalo de tiros	200 m
Número de receptores	96
Intervalo de receptores	50 m
Afastamentos	-2532...2531 m
Número de CMPs	1604
Cobertura máxima	12 traços
Intervalo entre CMPs	25 m
Frequência dominante	$\approx 35$ Hz
Tempo de registro	4,0 s
Amostragem temporal	4 ms

De posse do dado sísmico de multicobertura pré-processado, do dado empilhado CMP e do modelo de velocidade NMO, pontos ao longo de horizontes (eventos de

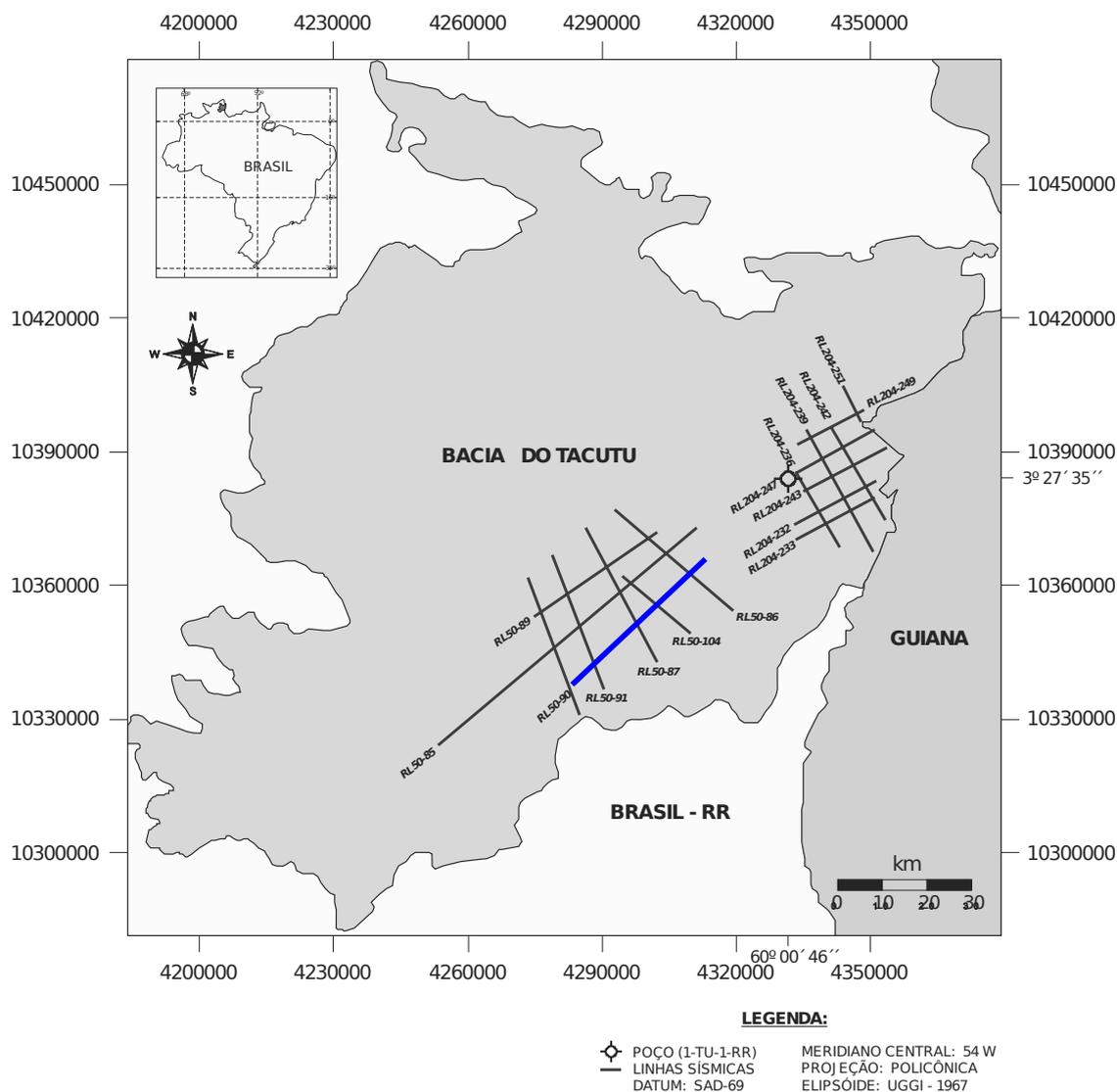


Figura 5.1: Localização da linha sísmica 50-RL-90, destacada em azul, na Bacia do Tacutu. Adaptada de Silva e Porsani (2006).

reflexão coerentes) são selecionados por um intérprete (Etapa 2). A Figura 5.2 apresenta o dado empilhado CMP, utilizado nessa etapa e os pontos selecionados se encontram destacados em pelos marcadores  $\times$ 's. Em seguida, sobre esses pontos, os parâmetros CRS são computados utilizando como método de estimação uma busca exaustiva utilizando a velocidade NMO inicial como guia (Etapa 3). Nesse exemplo, as aberturas de estimação propostas no Capítulo 3 foram utilizadas com  $\alpha = 1.2$  (primeira amostra de tempo) e  $\alpha = 1.6$  (última amostra de tempo), com valores de  $\alpha$  sendo interpolados linearmente entre eles.

Com os parâmetros CRS estimados nesses pontos, inicia-se a Etapa 4, onde as guias dos parâmetros  $A$  e  $B$  são construídas utilizando os esquemas de interpolação ao longo do horizonte (utilizando cúbicas entre cada par de pontos) e a interpolação entre os horizontes (utilizando a Triangulação de DeLauney), como descrito no Capítulo 4. Ainda na Figura 5.2, pode-se observar os pontos auxiliares interpolados nessa etapa, destacados pelos marcadores +’s pequenos.

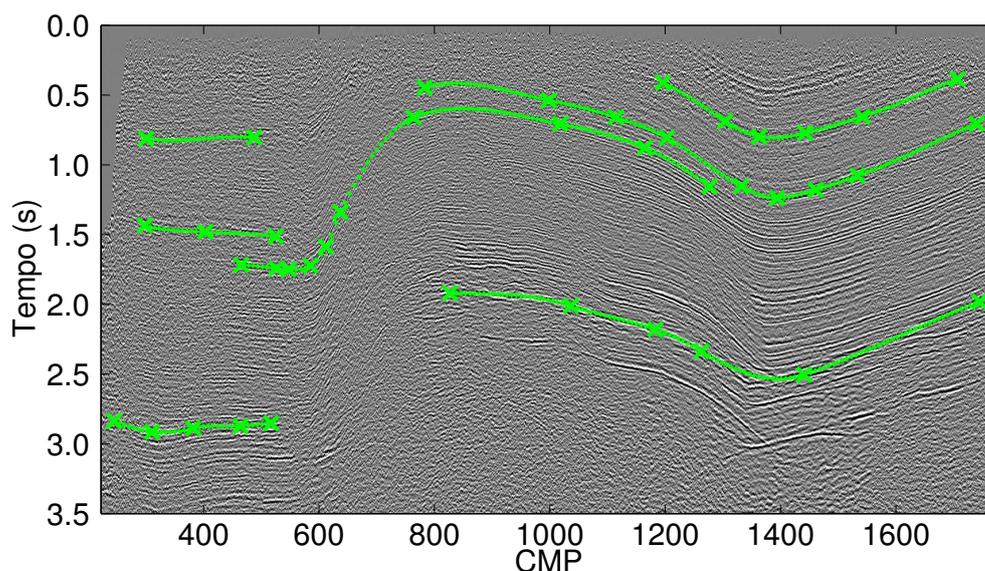


Figura 5.2: Dado empilhado CMP considerado na seleção inicial de horizontes. Os pontos selecionados se encontram destacados pelos  $\times$ 's e os pontos auxiliares interpolados com base nos valores do parâmetro  $A$  destacados pelos  $+$ 's pequenos.

Em seguida, uma etapa de controle de qualidade se faz necessária (Etapa 5). Seu objetivo é garantir que as curvas obtidas são representativas das tendências observadas no dado empilhado CMP. Em termos práticos, deve-se garantir que os pontos auxiliares obtidos se encaixam nos eventos visíveis no dado empilhado. No exemplo apresentado, um dos horizontes interpolados não atendeu a esse critério, como pode ser visto na Figura 5.3 (a) no CMP 1350 e tempo 2.5 segundos. Para melhorar o ajuste, um novo ponto foi selecionado e um novo processo de estimação de parâmetros e de interpolação foi realizado. Nesse caso, apenas os parâmetros CRS para o novo ponto devem ser estimados. O resultado dessa etapa de QC pode ser visto na Figura 5.3 (b), assim como as guias para o parâmetro  $A$  obtidas em ambos os casos, Figura 5.3 (c) e (d). Vale notar que os pontos auxiliares nos intervalos adjacentes

não sofreram nenhuma alteração quando o novo ponto foi considerado. Essa é uma característica positiva da interpolação cúbica utilizada. Outro aspecto importante a ser mencionado é que esses pontos auxiliares não precisam se encaixar perfeitamente nos eventos de reflexão, pois a etapa de refino global posterior será responsável por realizar esses pequenos ajustes, da ordem de  $\pm 4^\circ$  em ângulos de emergência.

Uma vez que o ajuste entre os horizontes interpolados e o dado empilhado CMP foram verificados e se encontram dentro da margem de tolerância do refino, os horizontes podem ser interpolados entre si de modo a construir a guia para o parâmetro  $A$ , como apresentado na Figura 5.4(a). A guia para o parâmetro  $B$  será obtida a partir da guia do parâmetro  $A$ , simplesmente derivando os valores da guia do parâmetro  $A$  na direção dos pontos médios e multiplicando-se por  $t_0$  (Equação 2.5). A guia do parâmetro  $B$  obtida nesse processo pode ser vista na Figura 5.4(b).

As guias dos parâmetros  $A$  e  $B$ , juntamente com o modelo de velocidade NMO (parâmetro  $C$ ), são usadas como valores iniciais para um processo de refinamento global (Etapa 6). Essa etapa é responsável por realizar os ajustes necessários aos parâmetros CRS de modo a maximizar o valor de semblance obtido para cada ponto. Os desvios máximos permitidos para cada guia foram: 8%,  $\pm 3.5^\circ$  e 15% para os parâmetros  $C$ ,  $A$  e  $B$ , respectivamente. Os resultados desse refinamento concluem a primeira iteração da estratégia de estimação iterativo-iterativo proposta. O dado empilhado CRS pode ser visto na Figura 5.5. Para os exemplos seguintes, duas regiões da Figura 5.5 serão ampliadas, assim como os parâmetros CRS obtidos nessa primeira iteração. Ambos podem ser vistos e comparados com os resultados obtidos pelas técnicas CMP e CRS com estratégia global nas Figuras 5.7 a 5.14.

O dado empilhado CRS obtido nessa primeira iteração pode ser utilizado em nova etapa de seleção de horizontes, dando início a uma segunda iteração. Por apresentar qualidade superior ao dado empilhado CMP, utilizado na seleção inicial de pontos, novos horizontes podem ser selecionados e todas as etapas anteriores repetidas. Os parâmetros CRS desses novos pontos são estimados cirurgicamente, avaliados, interpolados e fornecidos a um novo processo de refinamento global de parâmetros CRS. A Figura 5.6 apresenta o dado empilhado CRS obtido na primeira iteração da estratégia proposta com os novos pontos selecionados e os pontos auxiliares obtidos via inter-

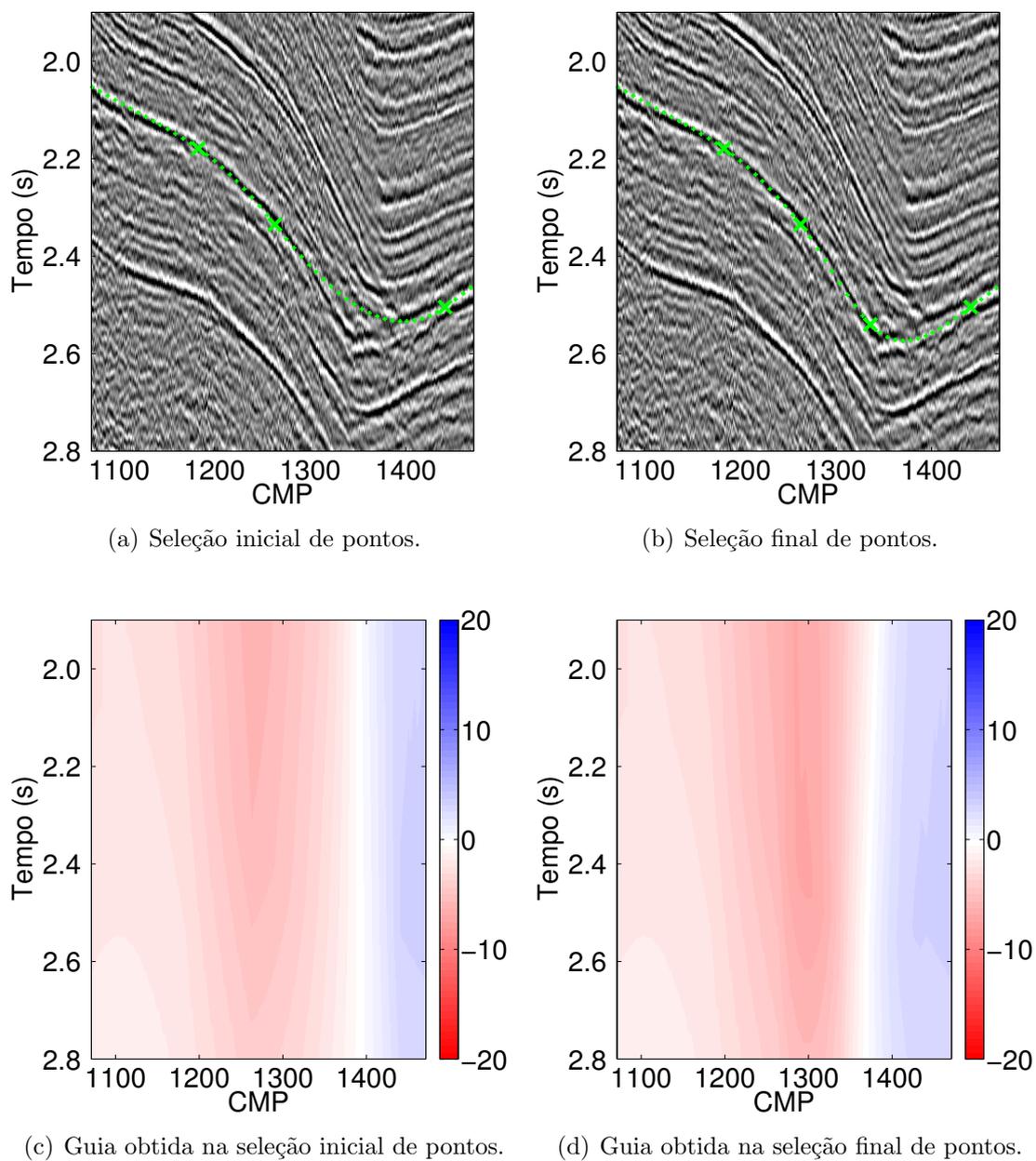
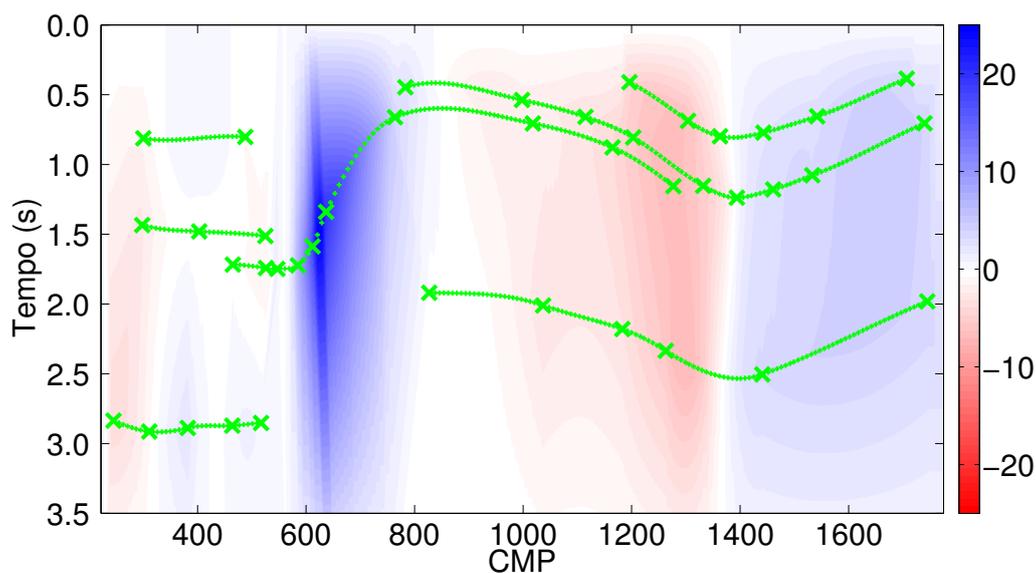
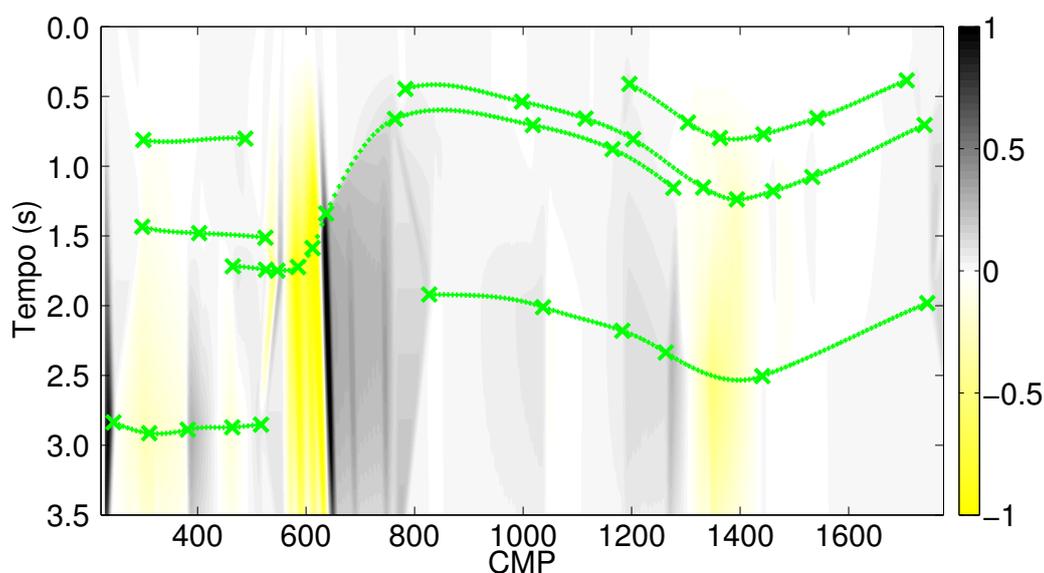


Figura 5.3: Destaque da região em que a interpolação de horizontes não apresentou resultados satisfatórios. Para corrigir essa situação, um novo ponto foi selecionado e o processo de interpolação refeito. As guias obtidas para o parâmetro  $A$  em ambos os casos também são apresentadas.



(a) Guia inicial do parâmetro  $A$ , convertido em ângulos de emergência. (*graus*)



(b) Guia inicial do parâmetro  $B$  ( $s^2/m^2$ )  $\times 10^{-6}$ .

Figura 5.4: Guias interpoladas dos parâmetros  $A$  e  $B$  obtidas na primeira iteração de processamento do CRS iterativo-iterativo.

polação cúbica. Nessa segunda iteração, a etapa de refinamento global pode ser mais localizada, uma vez que mais informações foram agregadas às guias e pode-se supor que essas sejam mais próximas do esperado. Sendo assim, os desvios máximos permitidos para cada guia nessa nova iteração foram: 8%,  $\pm 1.5^\circ$  e 10% para os parâmetros  $C$ ,  $A$  e  $B$ , respectivamente. Como resultado dessa segunda iteração, temos um novo

dado empilhado CRS e novo conjunto de parâmetros CRS, os quais podem ser vistos nas Figuras 5.7 a 5.14. Como esperado, as guias introduziram uma tendência nos parâmetros  $A$  e  $B$ , não permitindo que estes fossem comprometidos por ruídos ou eventos indesejados, assim como a guia de velocidade NMO (parâmetro  $C$ ) o fez nos experimentos apresentados no Capítulo 2. Isso fez com que as regiões onde os parâmetros  $A$  e  $B$  apresentavam valores espúrios, responsáveis pelas “minhocas” presentes nas estratégias de estimação global, local e híbrida fossem eliminadas. Uma terceira iteração foi realizada, porém as diferenças entre os resultados obtidos foram desprezíveis e esta foi desconsiderada.

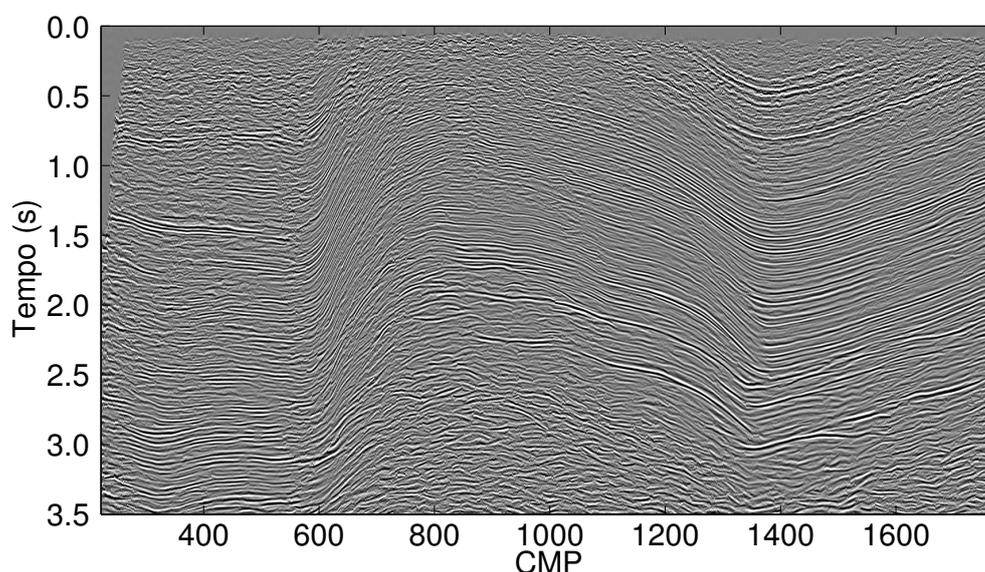


Figura 5.5: Dado empilhado CRS obtido na primeira iteração do processamento CRS iterativo-iterativo, considerando guias em todos os parâmetros CRS.

Concluindo, o emprego da estratégia de estimação iterativo-iterativa forneceu resultados de qualidade superior, tanto no que diz respeito aos empilhados CRS, quanto aos parâmetros CRS. Métodos de estimação exaustivos utilizando aberturas semiautomáticas na direção dos pontos médios puderam ser aplicados à construção de guias de parâmetros, construídas interativamente com a intervenção de um intérprete. Como esperado, as guias apresentaram valores similares aos estimados pelas estratégias convencionais ao longo dos eventos coerentes e foram capazes de

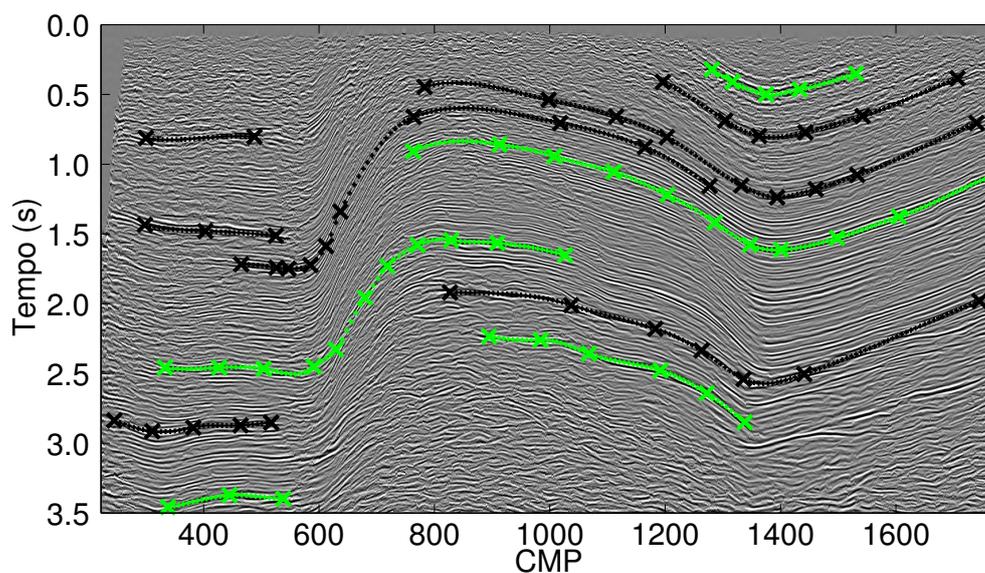


Figura 5.6: Seleção de novos horizontes no dado empilhado CRS da Figura 5.5. Os novos pontos selecionados se encontram destacados, em verde, pelos  $\times$ 's e os pontos auxiliares interpolados com base nos valores do parâmetro  $A$  destacados pelos  $+$ 's pequenos. Em preto, temos os pontos selecionados na iteração anterior.

preservar a tendência de variação desses parâmetros fora dessas regiões, fornecendo dados empilhados e parâmetros CRS bem definidos e confiáveis.

Além disso, o custo computacional de aplicação do método CRS foi consideravelmente reduzido. A Tabela 5.2 apresenta os parâmetros de execução das estratégias de estimação global e interativa-iterativa utilizados nesses exemplos, onde é possível observar uma redução de custo de aproximadamente 75%.

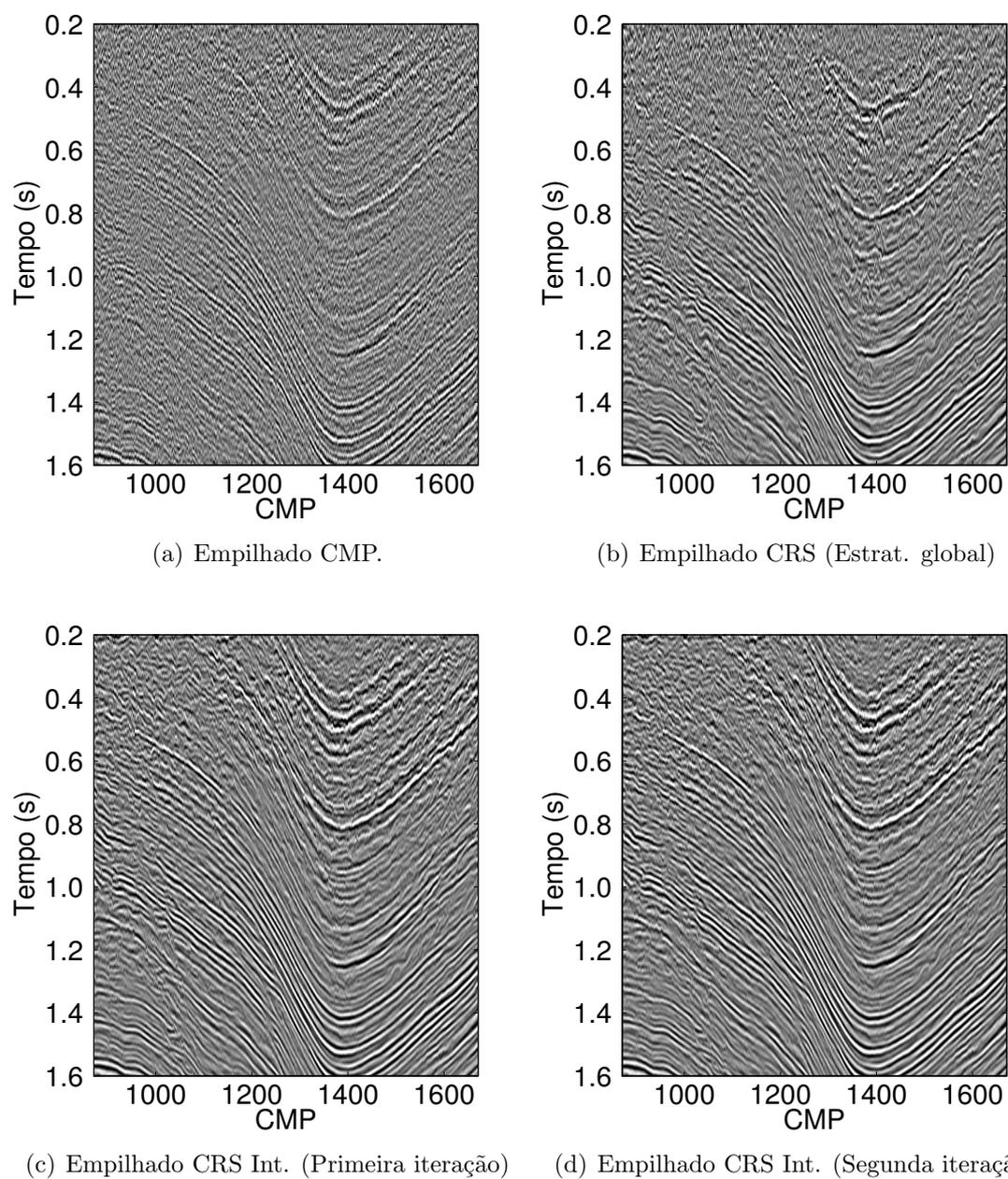


Figura 5.7: Região 1: Comparação entre os dados empilhados (finais) obtidos pelo (a) método CMP e pelo método CRS através das estratégias de (b) estimação global, (c) primeira iteração e (d) segunda iteração do CRS interativo-iterativo.

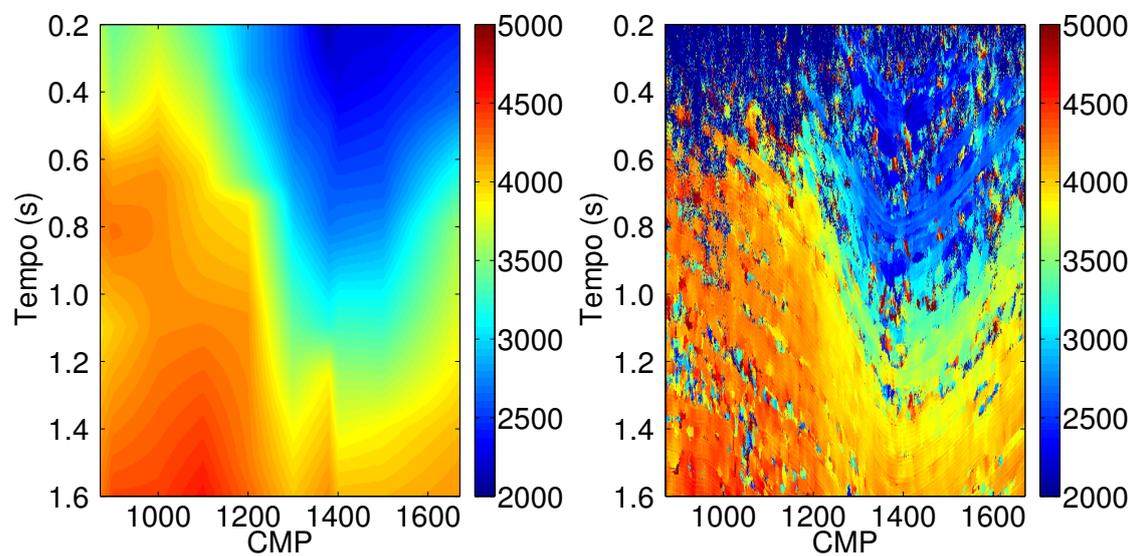
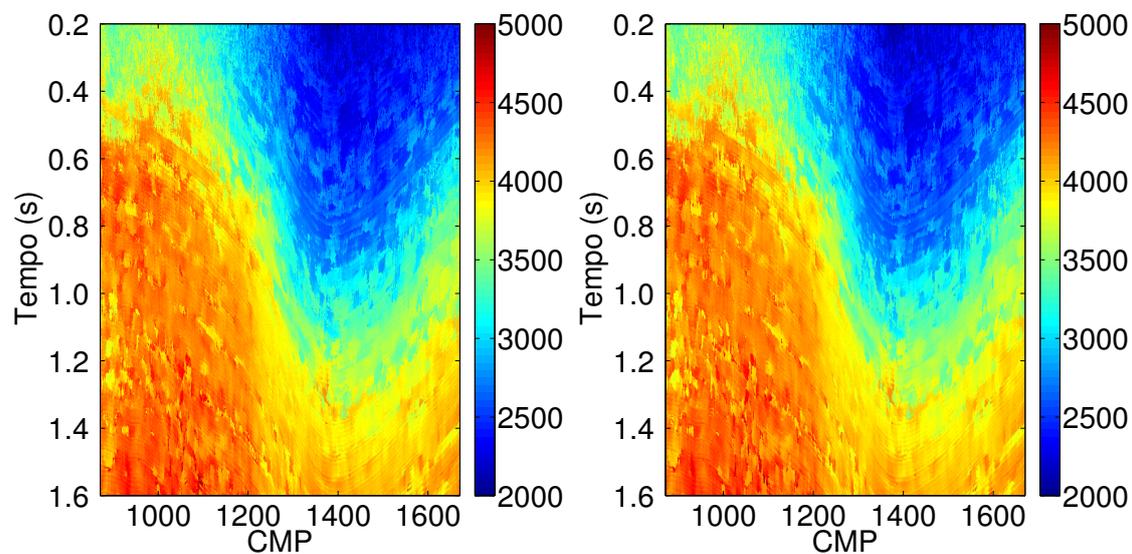
(a) Parâmetro  $C$ : Modelo inicial.(b) Parâmetro  $C$ : Refinado na estrat. global.(c) Parâmetro  $C$ : Refinado na primeira iteração.(d) Parâmetro  $C$ : Refinado na segunda iteração.

Figura 5.8: Região 1: (a) Guia inicial para o parâmetro  $C$  obtido através de análise de velocidades convencional. Comparação entre os parâmetros  $C$  obtidos pelo método CRS através das estratégias de (b) estimativa global, (c) primeira iteração e (d) segunda iteração do CRS iterativo-iterativo.

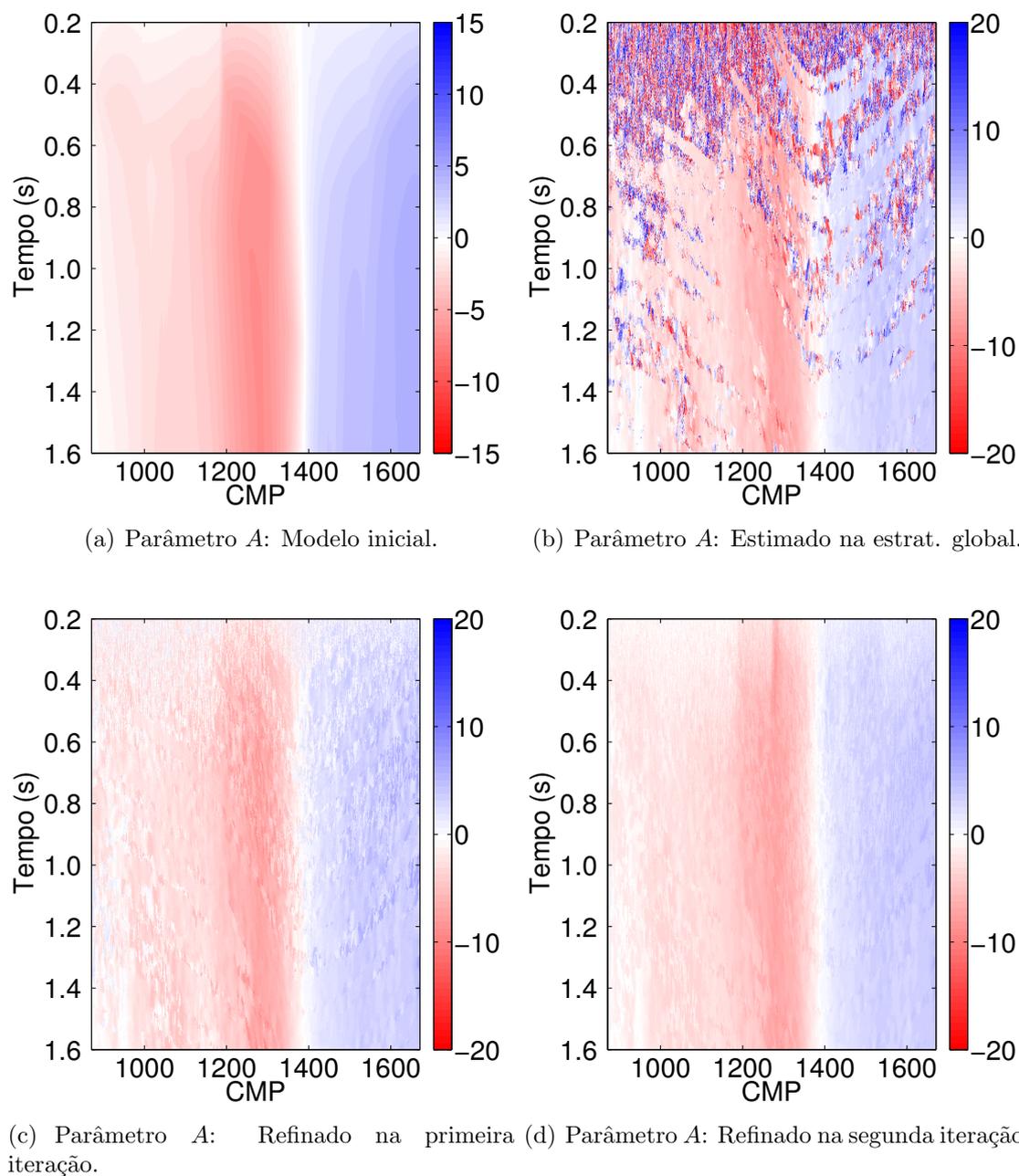


Figura 5.9: Região 1: (a) Guia inicial para o parâmetro  $A$  obtido na primeira iteração do CRS interativo-iterativo. Comparação entre os parâmetros  $A$  obtidos pelo método CRS através das estratégias de (b) estimativa global, (c) primeira iteração e (d) segunda iteração do CRS interativo-iterativo.

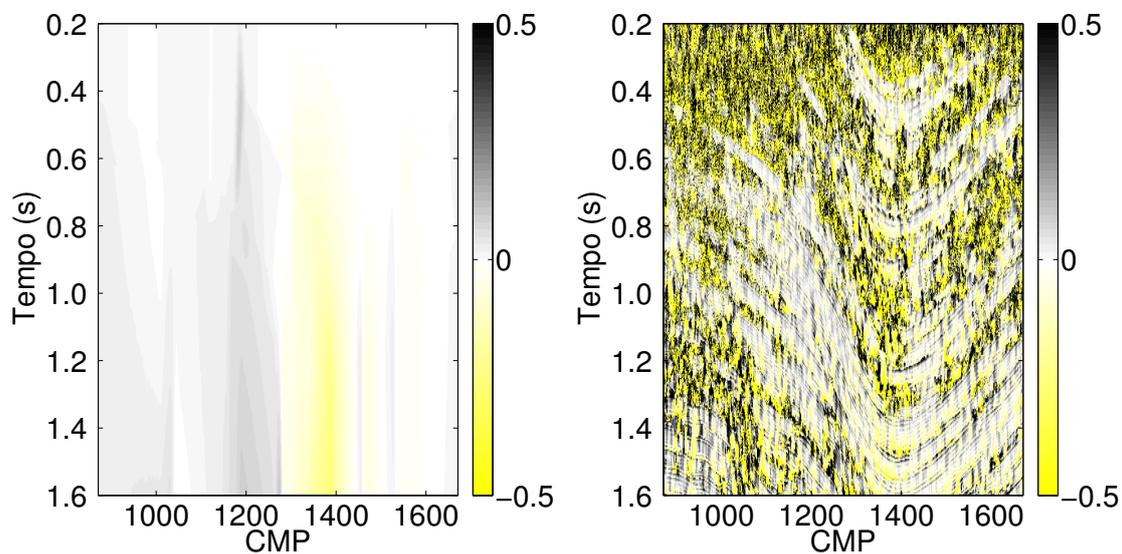
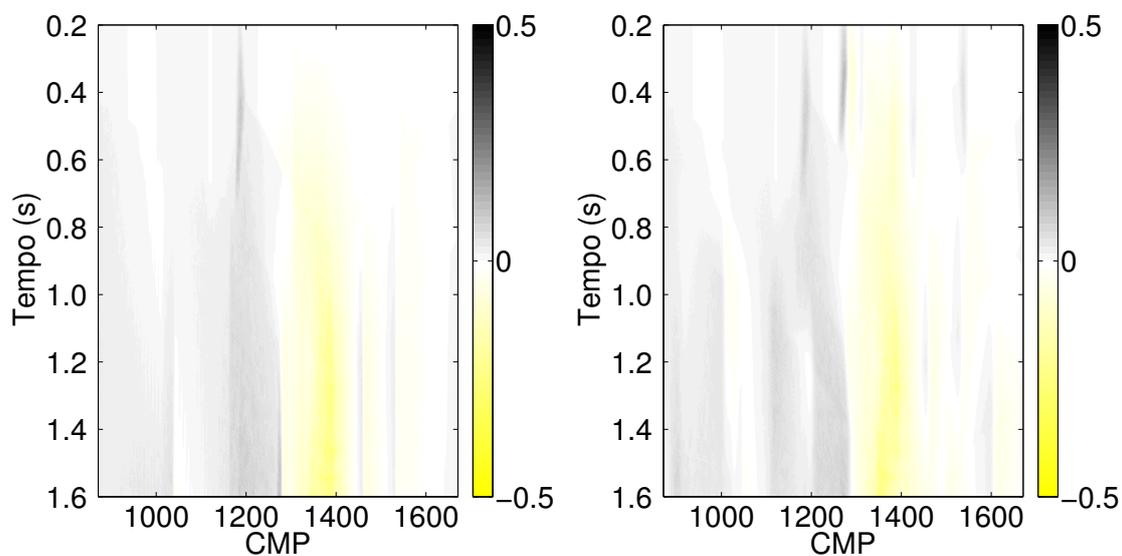
(a) Parâmetro  $B$ : Modelo inicial.(b) Parâmetro  $B$ : Estimado na estrat. global.(c) Parâmetro  $B$ : Refinados na primeira iteração.(d) Parâmetro  $B$ : Refinado na segunda iteração.

Figura 5.10: Região 1: (a) Guia inicial para o parâmetro  $B$  obtido na primeira iteração do CRS iterativo-iterativo. Comparação entre os parâmetros  $B$  obtidos pelo método CRS através das estratégias de (b) estimativa global, (c) primeira iteração e (d) segunda iteração do CRS iterativo-iterativo.

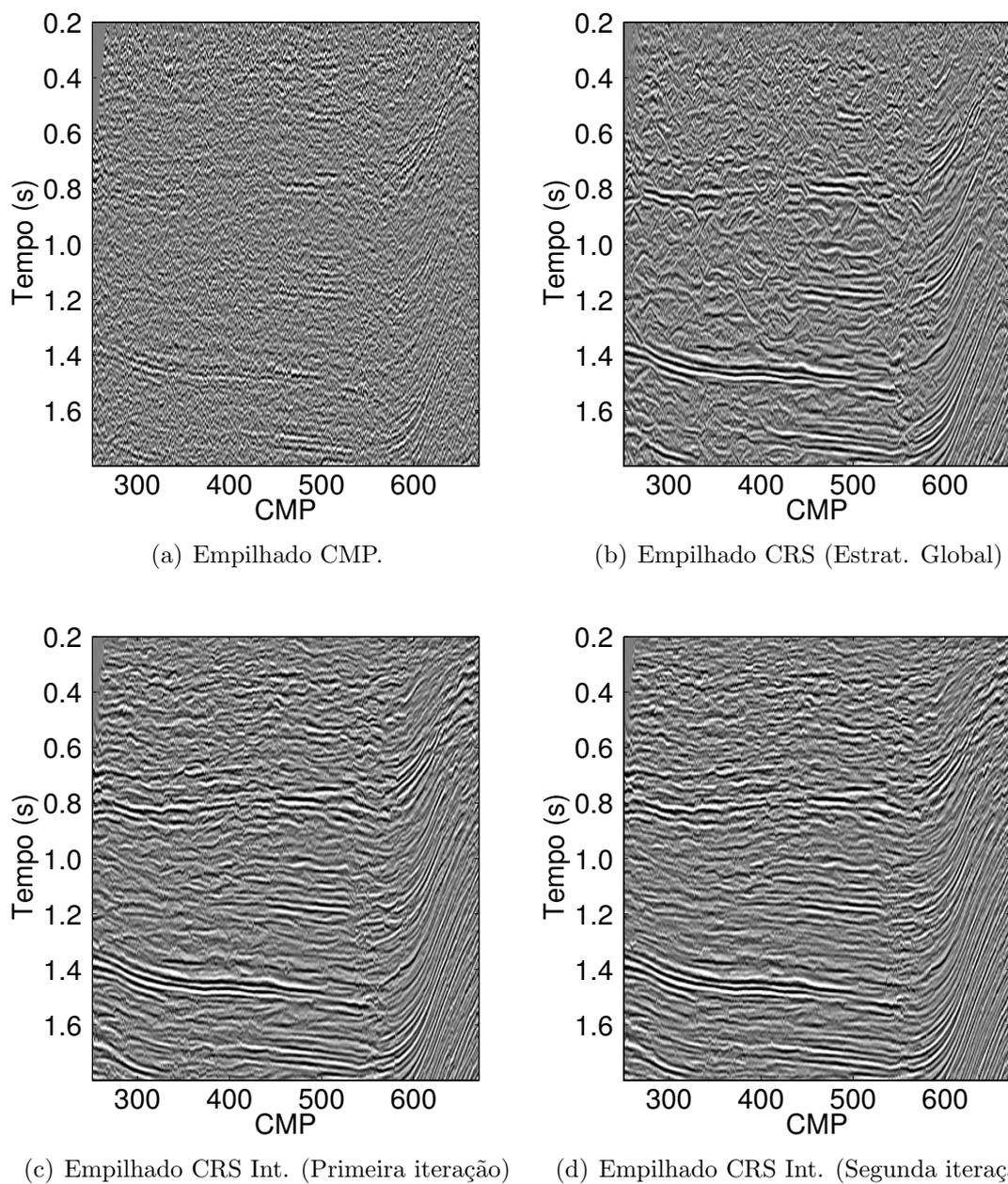


Figura 5.11: Região 2: Comparação entre os dados empilhados (finais) obtidos pelo (a) método CMP e pelo método CRS através das estratégias de (b) estimação global, (c) primeira iteração e (d) segunda iteração do CRS interativo-iterativo.

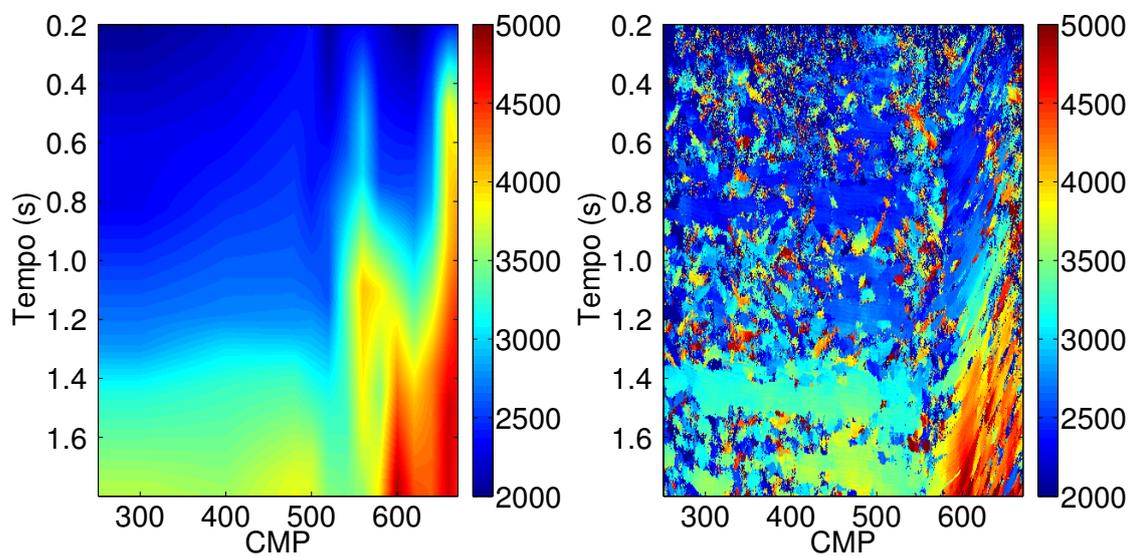
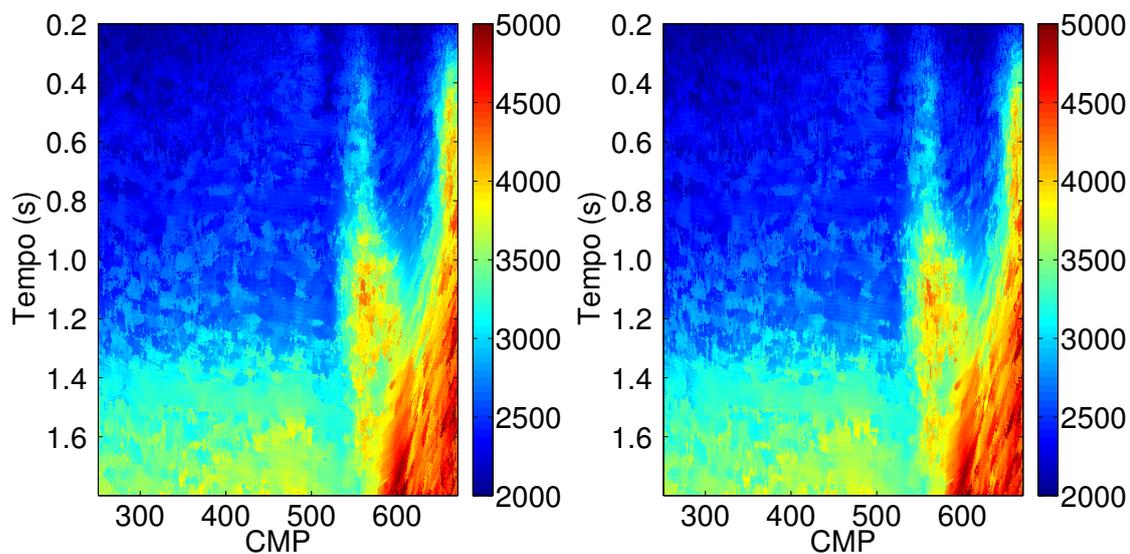
(a) Parâmetro  $C$ : Modelo inicial.(b) Parâmetro  $C$ : Refinado na estrat. elobal.(c) Parâmetro  $C$ : Refinado na primeira iteração.(d) Parâmetro  $C$ : Refinado na segunda iteração.

Figura 5.12: Região 2: (a) Guia inicial para o parâmetro  $C$  obtido através de análise de velocidades convencional. Comparação entre os parâmetros  $C$  obtidos pelo método CRS através das estratégias de (b) estimativa global, (c) primeira iteração e (d) segunda iteração do CRS iterativo-iterativo.

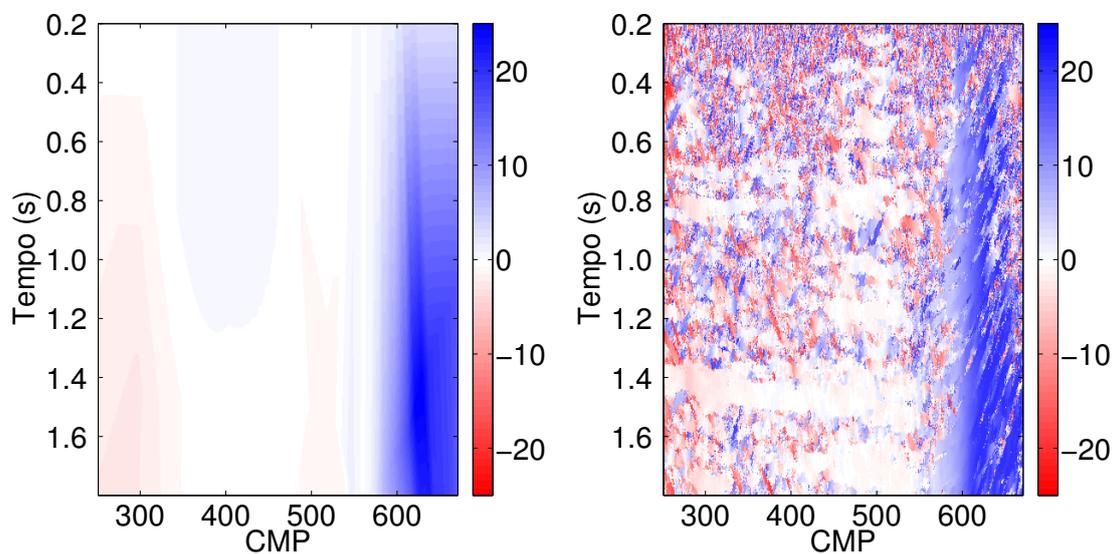
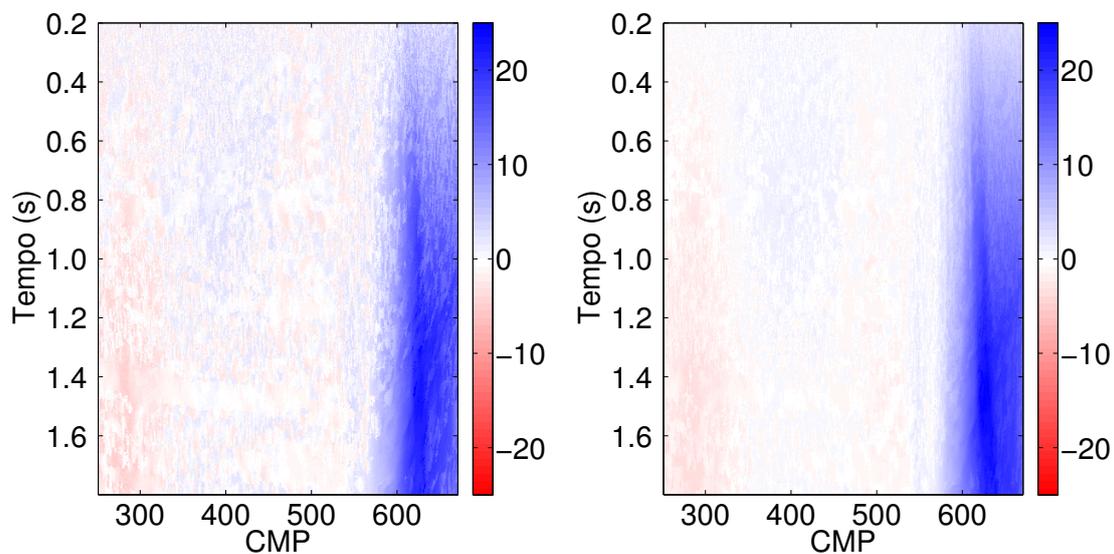
(a) Parâmetro  $A$ : Modelo inicial.(b) Parâmetro  $A$ : Estimado na estrat. global.(c) Parâmetro  $A$ : Refinado na primeira iteração.(d) Parâmetro  $A$ : Refinado na segunda iteração.

Figura 5.13: Região 2: (a) Guia inicial para o parâmetro  $A$  obtido na primeira iteração do CRS iterativo-iterativo. Comparação entre os parâmetros  $A$  obtidos pelo método CRS através das estratégias de (b) estimativa global, (c) primeira iteração e (d) segunda iteração do CRS iterativo-iterativo.

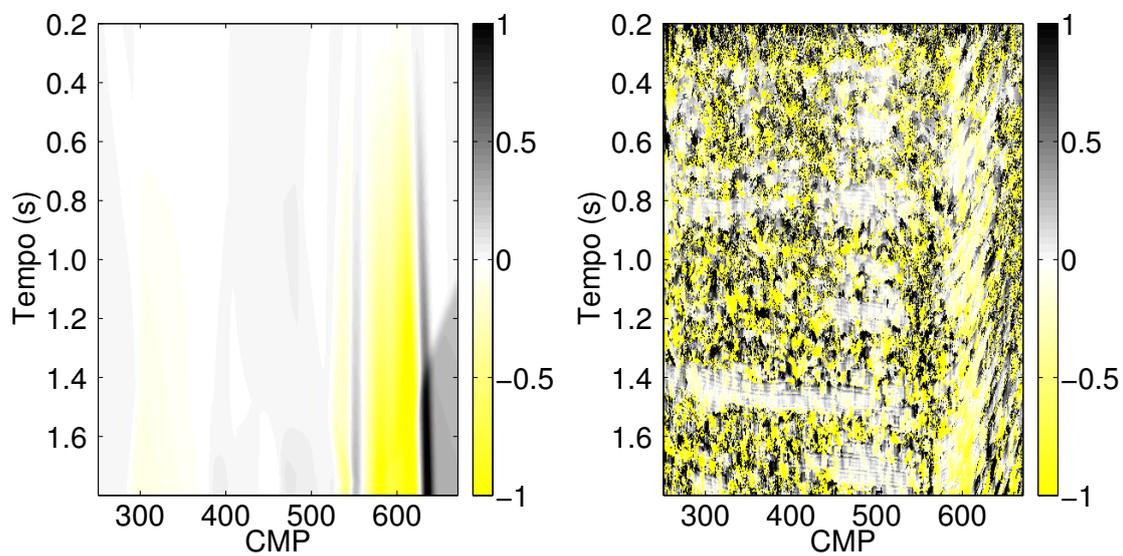
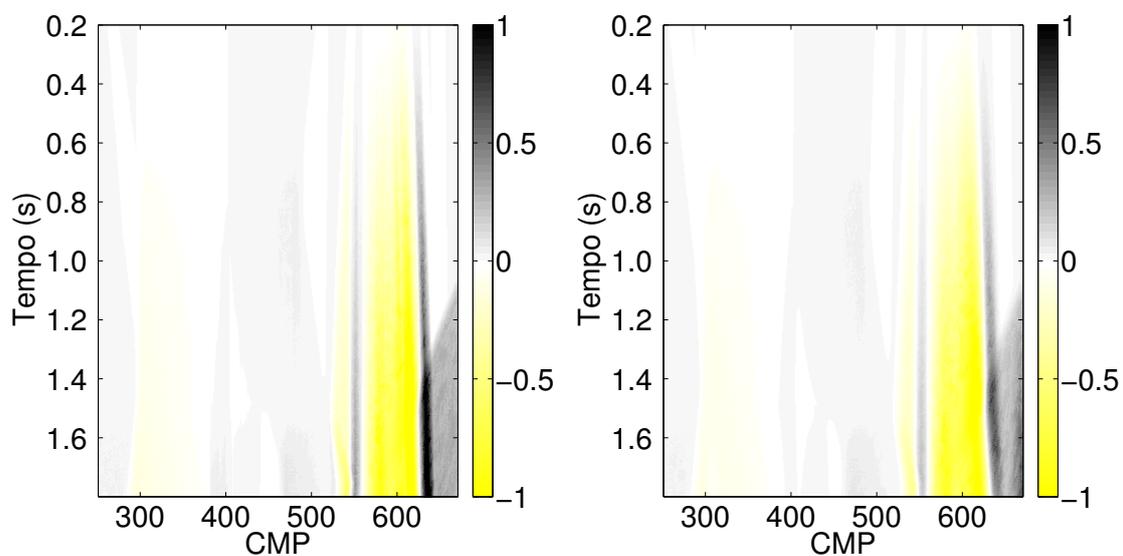
(a) Parâmetro  $B$ : Modelo inicial.(b) Parâmetro  $B$ : Estimado na estrat. global.(c) Parâmetro  $B$ : Refinados na primeira iteração.(d) Parâmetro  $B$ : Refinado na segunda iteração.

Figura 5.14: Região 2: (a) Guia inicial para o parâmetro  $B$  obtido na primeira iteração do CRS interativo-iterativo. Comparação entre os parâmetros  $B$  obtidos pelo método CRS através das estratégias de (b) estimativa global, (c) primeira iteração e (d) segunda iteração do CRS interativo-iterativo.

Tabela 5.2: Comparação dos parâmetros de execução do método CRS utilizando as estratégias global e interativa-iterativa para os exemplos apresentados no Capítulo 5. Em todos os experimentos, o mesmo *hardware* (apresentado no Apêndice A) e os mesmos conjuntos de parâmetros de abertura foram utilizados.

Estratégia de estimação	Método de estimação	Parâmetro estimado	Nº de traços	Nº de amostras	Nº de semblances por amostra	Nº total de semblances	Tempo de execução (s)
<b>Global</b>	Heurístico (DE)	Param. $A$ , $B$ e $C$	172	1642496	<b>2250</b>	<b>3.70E+09</b>	<b>8171</b>
<b>Int-Iterativa Iteração 1</b>	Exaustivo	Param. $A$ , $B$ e $C$	172	41	780861	3.20E+07	243
	Heurístico (DE)	Refino	172	1642496	225	3.70E+08	809
		<b>Total</b>	-	-	<b>781086</b>	<b>4.02E+08</b>	<b>1052</b>
<b>Int-iterativa Iteração 2</b>	Exaustivo	Param. $A$ , $B$ e $C$	172	36	780861	2.81E+07	212
	Heurístico (DE)	Refino	172	1642496	225	3.70E+08	810
	-	<b>Total</b>	-	-	<b>781086</b>	<b>3.98E+08</b>	<b>1022</b>
<b>Total</b>	-	-	-	-	-	<b>7.99E+08</b>	<b>2074</b>

---

## 6 Conclusões

---

Nesse trabalho foram discutidos aspectos práticos de aplicação do método CRS. Para isso, fluxos de trabalho detalhados foram apresentados no Capítulo 2 para três estratégias de estimação de parâmetros CRS, a saber: Global, Híbrida e Local. Como exemplo, essas estratégias foram aplicadas a um dado real terrestre utilizando o algoritmo genético *Differential Evolution* (DE) como método de estimação. Os resultados obtidos foram discutidos e as principais diferenças, vantagens e desvantagens de cada estratégia foram apresentadas. Finalmente, esses resultados (dados empilhados e parâmetros CRS) foram comparados entre si, onde concluiu-se que a estratégia de estimação global forneceu os melhores resultados. Porém, em termos de custo-benefício, a estratégia de estimação híbrida representa a melhor opção.

No Capítulo 3 a influência das aberturas de estimação e empilhamento nas direções de meio afastamentos e pontos médios foram relacionadas a processos de silenciamento de traços, usuais às práticas de processamento pelo método CMP. A abertura em meio afastamento pôde ser relacionada à resolução temporal do dado empilhado, assim como no método CMP, e a abertura em pontos médios à resolução lateral (ou espacial). A partir dessas discussões uma expressão, baseada na Zona Projetada de Fresnel, foi deduzida para computar semiautomaticamente aberturas na direção dos pontos médios. Tal expressão depende da velocidade NMO, do tempo do raio normal e da largura do pulso.

Analisando os parâmetros estimados nos exemplos do Capítulo 2, os benefícios associados ao uso de guias de parâmetros foram identificados. Porém, usualmente, apenas guias para velocidade NMO (parâmetro  $C$ ) são produzidas durante as etapas de processamento de um dado sísmico. Desse modo, foi proposta uma estratégia de estimação global de parâmetros CRS, de reduzido custo computacional, capaz de construir tais guias de parâmetros de maneira interativa e iterativa. Essa estratégia, apresentada em detalhes no Capítulo 4, consiste nas seguintes etapas: (a) Seleção de pontos ao longo de eventos em uma seção empilhada inicial (CMP ou CRS); (b) Estimação global e exaustiva dos parâmetros CRS nesses pontos utilizando as

aberturas semiautomáticas na direção dos pontos médios propostas no Capítulo 3; (c) Interpolação dos parâmetros CRS obtidos de modo a construir guias; (d) Refino global desses parâmetros CRS utilizando as guias obtidas como valores iniciais e empilhamento CRS. Esse processo é repetido adicionando, subtraindo ou editando os pontos selecionados até que o resultado esperado seja alcançado ou que a diferença entre iterações seja desprezível.

Comparado com a estratégia de estimação global, a aplicação dessa abordagem em um dado real terrestre produziu dados empilhados de melhor qualidade e com uma expressiva redução do custo computacional, de aproximadamente 75%. As guias de parâmetros construídas foram capazes de capturar a tendência de variação esperada para todos os parâmetros CRS e eventuais erros ou desvios puderam ser facilmente identificados e corrigidos (adicionando ou subtraindo pontos) entre iterações. Como esperado, pequenos desvios entre essas guias e o dado foram facilmente corrigidos na etapa de refino dos parâmetros.

Uma das principais vantagens da abordagem CRS interativa-iterativa é a introdução da intervenção humana para controlar a construção das guias de parâmetros CRS. Esse aspecto foi fundamental para alcançar os resultados obtidos. Porém, para a efetiva aplicação da abordagem proposta é necessário treinamento, para que o intérprete compreenda como as guias são construídas e seja capaz de selecionar os pontos adequadamente.

Finalmente, como trabalhos futuros, pode-se citar: (1) Generalização das aberturas semiautomáticas em pontos médios e da abordagem interativa-iterativa para o caso 3D; (2) Investigar novos métodos de estimação para as etapas de refino, uma vez que nesse estudo, apenas a heurística DE foi utilizada; (3) Investigar e realizar experimentos de estabilidade para o parâmetro  $B$  e mensurar a influência do mesmo no empilhado final; (4) Adaptar a abordagem interativa-iterativa para reduzir o custo de aplicação de migrações em tempo do tipo Common Reflection Point (CRP) (Coimbra et al., 2016). (5) Utilizar os horizontes interpolados e os parâmetros CRS refinados pela abordagem interativa-iterativa diretamente na Tomografia NIP.

---

# Referências Bibliográficas

---

## Referências Bibliográficas

- ASGEDOM, E. G.; GELIUS, L.-J.; TYGEL, M. 2D common-offset travelttime based diffraction enhancement and imaging. **Geophysical Prospecting**, v. 61, n. 6, p.1178–1193, 2013.
- BARROS, T.; FERRARI, R.; KRUMMENAUER, R. et al. Differential evolution-based optimization procedure for automatic estimation of the common-reflection surface travelttime parameters. **Geophysics**, v. 80, n. 6, p.WD189–WD200, 2015.
- BORIN, E.; DA SILVA, H. C.; FACCIPIERI, J. H. et al., 2015, Accelerating semblance computations on heterogeneous devices using openCL: Technical report.
- CARMO, K. M. L., 2004, Métodos de otimização global aplicados na busca de parâmetros src: Master's thesis, Universidade Federal do Pará.
- COIMBRA, T. A.; FACCIPIERI, J. H.; RUEDA, D. S. et al. Common-reflection-point time migration. **Studia Geophysica et Geodaetica**, v. 60, 2016.
- COIMBRA, T. A.; FACCIPIERI, J. H.; TYGEL, M., 2015, Time-to-depth conversion using modeling rays: Technical report.
- COXETER, H. S. M., Introduction to geometry: Wiley, 1969.
- DUVENECK, E. 3D tomographic velocity model estimation with kinematic wavefield attributes. **Geophysical Prospecting**, v. 52, n. 6, p.535–545, 2004.
- FACCIPIERI, J. H.; COIMBRA, T. A.; GELIUS, L.-J. et al. Stacking apertures and estimation strategies for reflection and diffraction enhancement. **Geophysics**, v. 81, n. 4, (Aceito para publicação) 2016.
- FACCIPIERI, J. H.; COIMBRA, T. A.; RUEDA, D. S. et al., 2015, Surgical CRS stacking: Technical report.
- FACCIPIERI, J. H.; SERRANO, D. R.; GELIUS, L. J. et al. Recovering diffractions in CRS stacked sections. **First Break**, v. 31, n. 1973, p.27–31, 2013.
- FARIAS, A. L., Resolução sísmica e conversão tempo-profundidade, através do método de superfície comum de reflexão: PhD thesis, Universidade Estadual de

- 
- Campinas, 2008.
- GARABITO, G.; CRUZ, J. C.; HUBRAL, P. et al., 2001, Common reflection surface stack: A new parameter search strategy by global optimization, *in* SEG, Expanded Abstracts: p., 2009–2012.
- GARABITO, G.; STOFFA, P. L.; LUCENA, L. S. et al. Part i — CRS stack: Global optimization of the 2d CRS-attributes. **Journal of Applied Geophysics**, v. 85, p.92–101, 2012.
- GELCHINSKY, B.; BERKOVITCH, A.; KEYDAR, S. Multifocusing homeomorphic imaging: Part 1. Basic concepts and formulas. **Journal of Applied Geophysics**, v. 42, n. 3-4, p.229–242, 1999a.
- , . Multifocusing homeomorphic imaging: Part 2. Multifold data set and multifocusing. **Journal of Applied Geophysics**, v. 42, n. 3-4, p.243–260, 1999b.
- HEILMANN, Z.; MÜLLER, H.; SATTA, G. et al., 2014, Real-time or full-precision CRS imaging using a cloud computing portal: Multi-offset GPR and shear-wave reflection data: Presented at the Near Surface Geoscience 2014 - 20th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics, EAGE Publications.
- HJELLE, O.; DAEHLEN, M., Triangulations and applications: Springer, 2006.
- HÖCHT, G.; de Bazelaire, E.; MAJER, P. et al. Seismics and optics: hyperbolae and curvatures. **Journal of Applied Geophysics**, v. 42, n. 3-4, p.261–281, 1999.
- HUBRAL, P. Computing true amplitude reflections in a laterally inhomogeneous earth. **Geophysics**, v. 48, n. 8, p.1051–1062, 1983.
- , . Preface: Special issue. **Journal of Applied Geophysics**, v. 42, n. 3-4, p.137–138, 1999.
- HUBRAL, P.; KREY, T., Interval Velocities from Seismic Reflection Time Measurements: Society of Exploration Geophysicists (SEG), 1980.
- LANDA, E.; GUREVICH, B.; KEYDAR, S. et al. Application of multifocusing method for subsurface imaging. **Journal of Applied Geophysics**, v. 42, n. 3-4, p.283–300, 1999.
- LOEWENTHAL, D.; LU, L. ROBERSON, R.; SHERWOOD, J. The wave equation applied to migration. **Geophysical Prospecting**, v. 24, n. 2, p.380–399, 1976.

- 
- MANN, J.; JÄGER, R.; MÜLLER, T. et al. Common-reflection-surface stack - a real data example. **Journal of Applied Geophysics**, v. 42, n. 3-4, p.301â–318, 1999.
- MARCHETTI, P.; ORIATO, D.; PELL, O. et al., 2010, Fast 3d ZO CRS stack – an FPGA implementation of an optimization based on the simultaneous estimate of eight parameters: Presented at the 72nd EAGE Conference and Exhibition incorporating SPE EUROPEC 2010, EAGE Publications.
- MAYNE, W. H. Common-reflection-point horizontal data stacking techniques. **Geophysics**, v. 27, n. 6, p.927–938, 1962.
- MÜLLER, A., The 3D common-reflection-surface stack - theory and application: PhD thesis, Universität Karlsruhe, 2003.
- MÜLLER, T., Common reflection surface staking method - seismic imaging without explicit knowledge of the velocity model: PhD thesis, Universität Karlsruhe, 1999.
- MÜLLER, T.; JÄGER, R.; HÖCHT, G. Common reflection surface staking method - imaging with an unknown velocity model. **68th Annual Internat. Mtg., Soc. Expl. Geophys.**, p.1764–1767, 1998.
- NEIDELL, N. S.; TANER, M. T. Semblance and other coherency measures for multichannel data. **Geophysics**, v. 36, n. 3, p.482–497, 1971.
- PERROUD, H.; TYGEL, M. Nonstretch NMO. **Geophysics**, v. 69, n. 2, p.599–607, 2004.
- SCHLEICHER, J.; HUBRAL, P.; TYGEL, M. et al. Minimum apertures and fresnel zones in migration and demigration. **Geophysics**, v. 62, n. 1, p.183–194, 1997.
- SILVA, M. G.; PORSANI, M. J. Aplicação de balanceamento espectral e DMO no processamento sísmico da bacia do tacutu. **Rev. Bras. Geof.**, v. 24, n. 2, p.273–290, 2006.
- STOCKWELL, J. J. W. The CWP/SU: Seismic un\*x package. **Computers and Geosciences**, p.415–419, 1999.
- TANER, M. T.; KOEHLER, F. Velocity spectra-digital computer derivation and applications of velocity functions. **Geophysics**, v. 34, n. 6, p.859–881, 1969.
- TYGEL, M.; MÜLLER, T.; HUBRAL, P. et al. Eigenwave based multiparameter travelttime expansions. **67th Annual Internat. Mtg., Soc. Expl. Geophys.**, p.1770–1773, 1997.

---

TYGEL, M.; SANTOS, L. T. Quadratic normal moveouts of symmetric reflections in elastic media: A quick tutorial. **Studia Geophysica et Geodaetica**, v. 51, n. 1, p.185–206, 2007.

YILMAZ, O. When reflections are not hyperbolas and reflectors are not points. **Journal of Applied Geophysics**, v. 42, n. 3-4, p.139–141, 1999.

———, Seismic data analysis: Society of Exploration Geophysicists, 2001.

---

# A

## Materiais Utilizados

---

Durante a elaboração dessa tese de doutorado, diferentes *softwares* foram utilizados, desenvolvidos e adaptados com o objetivo de atender às necessidades envolvidas em sua produção. O mesmo se aplica aos dados sísmicos e aos diferentes *hardwares* utilizados. Nesse apêndice, essas informações serão descritas detalhadamente.

### A.1 *Softwares*

Foram utilizadas computadores com os seguintes sistemas operacionais **Linux Mint 17.3** e **CentOS 6.5** e os seguintes programas:

**3DCRS**: Programa desenvolvido por Alex Müller, da Universidade de Karlsruhe (Alemanha), dentro do consórcio WIT (*Wave Inversion Technology*) (Müller, 2003). Este programa também foi modificado para realizar estimações globais de parâmetros CRS utilizando o algoritmo genético *Differential Evolution*.

**OpenMPI**: Pacote para paralelização em sistemas de memória distribuída, utilizado na execução do programa 3DCRS.

**Seismic Un\*x**: O pacote SU, distribuído livremente pelo CWP (*Center for Wave Phenomena*), foi utilizado principalmente na manipulação e visualização de dados durante o processamento dos mesmos. Maiores informações sobre o SU podem ser encontradas em Stockwell (1999) e <http://www.cwp.mines.edu/cwpcodes/>.

**Norsar 2D Ray Modelling 5.6**: *Software* de modelagem de dados sísmicos, através de traçamento de raios, utilizado na construção do dado sintético Sol Nascente 2D.

**Matlab R2009a**: O programa Matlab, desenvolvido pela *MathWorks*, juntamente com o pacote **SeismicLab** (<http://seismic-lab.physics.ualberta.ca/>) para trabalhar com dados no formato SU e SEG-Y, foram utilizados como primeira

---

plataforma de desenvolvimento e de testes dos métodos aqui apresentados, bem como na geração das imagens de dados sísmicos.

**Kile 2.1:** Utilizando o processador de texto **T<sub>E</sub>X** de distribuição livre e o pacote macro **L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X 2<sub>ε</sub>** na elaboração da tese. As referências bibliográficas foram geradas com **BibT<sub>E</sub>X**.

**Inkscape 0.91:** *Software* livre para editoração eletrônica de imagens e documentos vetoriais.

## A.2 *Hardwares*

Para os experimentos apresentados e a elaboração da tese os seguintes computadores foram utilizados: 1) *Notebook* Dell Inspiron (processador Intel® i7™ 3632QM com 4 *threads* de 2.20 GHz com 8 GB de RAM); 2) *Workstation* Dell (processador Intel® i7™ 5930K com 12 *cores* com 64 GB de RAM).

Todos os tempos de execução descritos nas Tabelas 2.1 e 5.2 foram obtidos utilizando apenas 10 *cores* da *Workstation* Dell.

## A.3 *Dados sísmicos*

Os seguintes dados sísmicos foram utilizados:

**Sol Nascente 2D:** Dado sintético 2D idealizado e modelado por Dany Rueda Serrano utilizando traçamento de raios no *software* Norsar. Esse dado contém quatro refletores (a saber: um plano horizontal, um plano inclinado, um semicírculo e outro plano horizontal) e foi utilizado especialmente durante o desenvolvimento e experimentos iniciais das técnicas aqui apresentadas nos Capítulos 3 e 4, a saber: Aberturas semiautomáticas na direção dos pontos médios e estratégia interativa-iterativa. Seus parâmetros de aquisição estão descritos na Tabela A.1.

**Tacutu (50-RL-90):** Dado real terrestre 2D adquirido na Bacia do Tacutu, região norte do Brasil. Esse dado foi utilizado nos exemplos de aplicação das estratégias global, híbrida, local e interativa-iterativa (Capítulos 2 e 4). Seus parâmetros de aquisição estão descritos na Tabela A.2.

**Jequitinhonha (Linha 214-2660):** Dado real marinho 2D adquirido na Bacia do Jequitinhonha, região nordeste do Brasil. Esse dado foi utilizado nos exemplos de aplicação das aberturas semiautomáticas na direção dos pontos médios (Capítulo 3). Seus parâmetros de aquisição estão descritos na Tabela A.3.

Tabela A.1: Dado sintético Sol Nascente 2D: Parâmetros de aquisição do dado sísmico de multicobertura.

Número de tiros	200
Intervalo de tiros	40 m
Número de receptores	46
Intervalo de receptores	40 m
Afastamentos	-40... - 1840 m
Número de CMPs	443
Cobertura máxima	23 traços
Intervalo entre CMPs	20 m
Frequência dominante	$\approx 50$ Hz
Tempo de registro	5,0 s
Amostragem temporal	2 ms

Tabela A.2: Dado Tacutu: Parâmetros de aquisição do dado sísmico de multicobertura.

Número de tiros	188
Intervalo de tiros	200 m
Número de receptores	96
Intervalo de receptores	50 m
Afastamentos	-2532...2531 m
Número de CMPs	1604
Cobertura máxima	12 traços
Intervalo entre CMPs	25 m
Frequência dominante	$\approx 35$ Hz
Tempo de registro	4,0 s
Amostragem temporal	4 ms

Tabela A.3: Dado Jequitinhonha: Parâmetros de aquisição do dado de multicober-  
tura.

Número de tiros	981
Intervalo de tiros	25 m
Número de receptores	120
Intervalo de receptores	25 m
Afastamentos	-150... - 3125 m
Número de CMPs	2079
Cobertura máxima	60
Intervalo entre CMPs	12,25 m
Frequência dominante	$\approx 25$ Hz
Tempo de registro	7 s
Amostragem temporal	4 ms