

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

**Obtenção de modelo de velocidades
pelo método *CRS***

Autor: Rodrigo Silva Nunes

Orientador: Prof. Dr. Martin Tygel

Co-orientador: Prof. Dr. Lúcio Tunes dos Santos

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

Obtenção de modelo de velocidades pelo método *CRS*

Autor: Rodrigo Silva Nunes

Orientador: Prof. Dr. Martin Tygel

Co-orientador: Prof. Dr. Lúcio Tunes dos Santos

Curso: Ciências e Engenharia de Petróleo

Dissertação de mestrado apresentada à Subcomissão de Pós-Graduação Interdisciplinar de Ciências e Engenharia de Petróleo (FEM e IG), como requisito para a obtenção do título de Mestre em Ciências e Engenharia de Petróleo.

Campinas, 2005
SP - Brasil

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

Nunes, Rodrigo Silva

N922o Obtenção de modelo de velocidades pelo método CRS / Rodrigo Silva
Nunes. -- Campinas, SP: [s.n.], 2005.

Orientadores: Martin Tygel, Lúcio Tunes dos Santos
Dissertação (mestrado) - 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. II. Santos, Lúcio Tunes dos. III. Universidade Estadual de
Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica e Instituto de Geociências.
IV. Título.

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

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

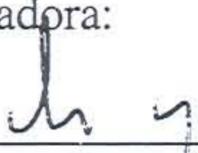
**Obtenção de modelo de velocidades
pelo método *CRS***

Autor: Rodrigo Silva Nunes

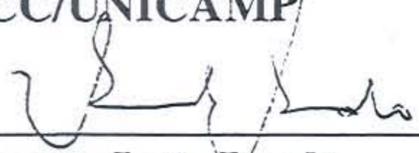
Orientador: Prof. Dr. Martin Tygel

Co-orientador: Prof. Dr. Lúcio Tunes dos Santos

Banca Examinadora:



Prof. Dr. Martin Tygel, Presidente
DMA/IMECC/UNICAMP



Prof. Dr. Renato Luiz Prado
AGG/IAG/USP



Prof. Dr. Rodrigo de Souza Portugal
DGRN/IGE/UNICAMP

Campinas, 07 de julho de 2005

Dedicatória

Dedico este trabalho à minha esposa Samantha, companheira de meus sonhos.

Agradecimentos

Agradeço ao meu orientador pela oportunidade de pesquisa e aprendizado em seu grupo de trabalho.

Ao meu co-orientador pelo incentivo e discussões sobre a dissertação.

Aos meus amigos do Laboratório de Geofísica Computacional (LGC) e, em especial, ao Fernando Gamboa, Lucas Freitas e Alcides Ribeiro, pelas diversas conversas, sugestões e suportes para o término deste trabalho.

Ao Centro de Estudos de Petróleo (CEPETRO) pelo auxílio financeiro fornecido.

Ao Consórcio *Wave Inversion Technology* (WIT).

Por fim, mas não menos importante, à minha esposa Samantha, pelo incentivo e compreensão de minha ausência.

Resumo

NUNES, Rodrigo Silva. *Obtenção de Modelo de Velocidades pelo Método CRS*. Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2005. 56 p. Dissertação (Mestrado)

O método *CRS* (do Inglês “Common Reflection Surface”), introduzido por Peter Hubral em 1997, é uma técnica alternativa ao convencional empilhamento *CMP*. O empilhamento *CRS* é capaz de fornecer não apenas uma melhoria nas seções simuladas de afastamento nulo (*ZO*), mas também um trio de parâmetros que extraem mais informações sobre a propagação do meio do que o único parâmetro do clássico método *CMP*, a velocidade *NMO*. O objetivo deste trabalho é analisar o potencial do método *CRS* em produzir modelos de velocidades sísmicas, analogamente para a computação da velocidade *NMO* no método *CMP*. Nós descrevemos os métodos *CMP* e *CRS* e comparamos suas performances sobre ilustrações sintéticas e exemplos de dados reais.

Palavras Chave

- Método *CMP*, Método *CRS*, Modelo de Velocidades

Abstract

NUNES, Rodrigo Silva. *Velocities Model Attainment by CRS Method*. Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2005. 56 p. Dissertação (Mestrado)

The Common Reflection Surface (*CRS*) method, introduced by Peter Hubral in 1997, is an alternative technique to the conventional *CMP* stacking. The *CRS* stack is able to provide not only improved simulated zero-offset sections, but also a set of parameters that convey more information of the propagating medium than the single *NMO*-velocity parameter of the classical *CMP* method. The objective of this work is to analyze the potential of the *CRS* method to produce seismic velocity models, analogously to the computation of the *NMO* velocities in the *CMP* method. We review the *CMP* and *CRS* methods, and compare their performances on illustrative synthetic and real data examples.

Key Words

- *CMP* Method, *CRS* Method, Velocities Model

Índice

Lista de Figuras	x
Nomenclatura	xii
1 – Introdução	01
1.1 Configuração de medida	02
1.2 Tipos de velocidades sísmicas	05
1.3 Plano geral da dissertação	06
2 – Tempos de Trânsito	07
2.1 Tempo de trânsito na configuração <i>CMP</i>	09
2.2 Tempo de trânsito geral	11
3 – Análise de Velocidades	15
3.1 Análise de coerência e empilhamento <i>CMP</i>	18
3.2 Análise de coerência e empilhamento <i>CRS</i>	23
3.2.1 Busca dos parâmetros <i>CRS</i>	24
4 – Experimentos Computacionais	28
4.1 Obtenção de V_{NMO} pelo método <i>CRS</i>	28
4.2 Análise qualitativa dos experimentos	29
4.3 Aplicação da metodologia em dados reais	40
5 – Conclusão	52
Referências Bibliográficas	55

Lista de Figuras

Introdução

1.1. Configurações de medida	04
------------------------------	----

Tempos de Trânsito

2.1. Configuração física de uma reflexão primária	07
2.2. Modelo de interface plana horizontal em um meio homogêneo	10
2.3. Modelo de camadas planas horizontais	11
2.4. Ilustração teórica dos parâmetros <i>CRS</i>	12

Análise de Velocidades

3.1. Comportamento da hipérbole	16
3.2. Ângulo entre u e e	17
3.3. Princípio da função semblance	18
3.4. Princípio do empilhamento <i>CMP</i>	20
3.5. Modelo geológico para estudo controlado sobre <i>VELAN</i>	20
3.6. Registros sísmicos do modelo geológico	21
3.7. Registros sísmicos com ruídos	21
3.8. Análise de Velocidades para o <i>CMP 120</i>	22
3.9. Curva de V_{NMO} do <i>CMP 120</i> obtida após análise de velocidades	23
3.10. Seções dos parâmetros <i>CRS</i> otimizados	26
3.11. Seção de coerência e seções <i>ZO CRS</i> (otimizado) e <i>ZO CMP</i>	27

Experimentos Computacionais

4.1. Fluxograma para obtenção de V_{NMO} pelo método <i>CRS</i>	28
4.2. Modelos de velocidades (m/s) <i>CMP</i> e <i>CRS</i> referentes ao modelo geológico	29
4.3. Modelos de Velocidades (m/s) <i>CMP</i> e <i>CRS</i> : eliminação de interferência	31
4.4. Fluxograma para interpolação das amplitudes de velocidade	32
4.5. Comparação dos modelos de velocidades (m/s): método <i>CMP</i> , CRS bruto, CRS interpolado e CRS suavizado	34
4.6. Curvas de velocidades para os <i>CMPs</i> 40, 160 e 280: método <i>CMP</i> , CRS bruto, CRS interpolado e CRS suavizado	35
4.7. Painéis da diferença entre os modelo de velocidades <i>CRS</i>	36
4.8. Curvas de velocidades para os <i>CMPs</i> 40, 160 e 280: método <i>CMP</i> , CRS suavizado e CRS suavizado em dobro	37
4.9. Comparação dos modelos de velocidades (m/s): método <i>CMP</i> , dado suavizado e dado suavizado na direção de ξ	38
4.10. Curvas de velocidades para o <i>CMP</i> 40: método <i>CMP</i> , dado suavizado e dado suavizado na direção ξ .	39
4.11. Seção de coerência <i>CRS</i> do dado real R01	40
4.12. Seções simuladas <i>ZO</i> de R01: método <i>CMP</i> e método <i>CRS</i>	41
4.13. Seções <i>CRS</i> de R01: β , R_{NIP} e V_{NMO}	43
4.14. Modelos de velocidades (m/s) do dado real R01: <i>CMP</i> , CRS bruto, CRS interpolado e CRS suavizado	44
4.15 Curvas de velocidades (m/s) de R01 para os <i>CMPs</i> 60, 110 e 210: método <i>CMP</i> , <i>CRS</i> bruto, <i>CRS</i> interpolado e <i>CRS</i> suavizado	45
4.16. Seção de coerência do dado real R02	46
4.17. Seções simuladas <i>ZO</i> de R02: método <i>CMP</i> e método <i>CRS</i>	47
4.18. Seções <i>CRS</i> do dado R02: β , R_{NIP} e V_{NMO}	49
4.19. Modelos de velocidades (m/s) do dado real R02: <i>CMP</i> , <i>CRS</i> bruto, CRS interpolado e <i>CRS</i> suavizado	50
4.20. Curvas de velocidades (m/s) de R02 para os <i>CMPs</i> 200, 800 e 1100: método <i>CMP</i> , <i>CRS</i> bruto, <i>CRS</i> interpolado e <i>CRS</i> suavizado	51

Nomenclatura

Letras Latinas

G	Referente ao receptor
R	Raio de curvatura
S	Referente à fonte
T	Tempo de trânsito
Z	Profundidade
h	Meio-afastamento
q	Parâmetro combinado obtido na busca no domínio <i>CMP</i>
v, V	Velocidade

Letras Gregas

β	Ângulo de chegada do raio na interface
ξ	Coordenada de um ponto

Subscritos

N	Referente à onda N
NIP	Referente à onda NIP

Siglas

<i>CMP</i>	Ponto Médio Comum (do Inglês <i>Common Midpoint</i>)
<i>CO</i>	Afastamento Comum (do Inglês <i>Common Offset</i>)
<i>CRS</i>	Superfície de Reflexão Comum (do Inglês <i>Common Reflection Surface</i>)
<i>CS</i>	Tiro Comum (do Inglês <i>Common Shot</i>)
<i>NIP</i>	Ponto de Incidência Normal (do Inglês <i>Normal Incident Point</i>)
<i>NMO</i>	Sobre Tempo Normal (do Inglês <i>Normal Moveout</i>)
<i>RMS</i>	do Inglês <i>Root Mean Square</i>
<i>ZO</i>	Afastamento Nulo (do Inglês <i>Zero Offset</i>)

Capítulo 1

Introdução

Um dos grandes desafios na exploração de hidrocarbonetos é obter uma imagem da subsuperfície para encontrar estruturas que possam conter petróleo. Métodos geofísicos (principalmente sísmicos) são utilizados com essa finalidade. No método sísmico, uma onda é provocada na superfície e sua reflexão ao longo das interfaces entre duas camadas do subsolo é detectada por receptores localizados em pontos previamente definidos. Os receptores registram o instante da chegada e a intensidade do sinal. Algoritmos computacionais processam esses sinais e, com base nos dados obtidos e na velocidade de propagação (calculada pela diferença na chegada da mesma onda a vários receptores), determinam a posição do obstáculo onde ocorreu a reflexão e elaboram uma “imagem” do subsolo, que revela algumas estruturas e anomalias. Esse processo parece simples, mas na prática é extremamente complexo, já que os resultados podem ser distorcidos de muitas maneiras, como por exemplo, a velocidade de propagação pode não ser constante. Assim, as distorções devem ser corrigidas, por sofisticados tratamentos matemáticos, para que a “imagem” geológica gerada para a área em estudo seja confiável.

A técnica conhecida como empilhamento horizontal ou empilhamento *CMP* (do Inglês, “*Common Midpoint*”) é considerada como sendo o maior avanço geofísico aplicado à sísmica de reflexão. Foi empregada no Brasil a partir do final da década de 1960. Possui grande desempenho porque possibilita o mapeamento de refletores em subsuperfície por meio da cobertura múltipla ou redundância de amostragem, proporcionando, entre outras vantagens, o aumento da razão sinal/ruído, tarefa básica do processamento sísmico.

No empilhamento sísmico é necessário conhecer estimativas para a função tempo de trânsito. Tradicionalmente, a aproximação do tempo de trânsito é função apenas de um parâmetro (velocidade do meio), sendo suficiente para situações não muito complexas. Fórmulas matemáticas que dependem de mais de um parâmetro mostram-se úteis na melhoria da qualidade das análises. A correção *NMO* (do Inglês “*Normal Moveout*”) e empilhamento horizontal (do Inglês “*stacking*”) são descritos por uma equação do tempo de trânsito simples, e caracteriza-se

pelo empilhamento de traços sísmicos considerando a organização em famílias *CMP* (Figura 1.1c).

Atualmente, algoritmos cada vez mais sofisticados têm sido implementados no âmbito do processamento sísmico com o objetivo de realçar as informações contidas nos dados oriundos de aquisições sísmicas terrestres e marítimas. Em anos recentes, as premissas para o empilhamento *CMP*, a saber: (a) sua limitação aos dados no domínio *CMP*, (b) eventos selecionados pelo intérprete e (c) extração de um único atributo (a velocidade *NMO*) dos dados, começaram a ser questionadas pela comunidade geofísica. Como uma resposta a estas limitações, novas propostas foram referidas como métodos independentes do macro modelo de velocidades. A característica comum das novas propostas é a utilização de tempo de trânsito gerais que podem empilhar dados de pares fonte-receptor que pertençam a um maior número de domínios, isto é, o empilhamento pode extrapolar o domínio *CMP*. O método *CRS* (do Inglês, “*Common Reflection Surface*”), introduzido por Peter Hubral em 1999, é uma delas.

A contribuição deste trabalho é mostrar a eficácia do método de empilhamento *CRS* uma vez que a indústria do petróleo utiliza-se amplamente o método de empilhamento *CMP*, bem como obter o modelo de velocidades sísmicas através deste método (Perroud e Tygel, 2003).

1.1 Configuração de Medida

O tempo de registro das ondas sísmicas depende, além do macromodelo de velocidade, da posição da fonte que a gerou e do receptor que a registrou. Esses pares fonte-receptor determinam uma configuração de medida específica que precisa ser conhecida.

Uma seção sísmica é um subconjunto de traços satisfazendo alguma regra de formação (configuração de medida). Cada tipo de seção sísmica produz uma informação diferente e, portanto, existem métodos específicos de processamento para cada uma.

Os tipos mais comuns de configurações são:

1. Seção de Afastamento Comum: *CO* (do Inglês, “*Common Offset*”)
2. Seção de Ponto Médio Comum: *CMP* (do Inglês, “*Common Midpoint*”)
3. Seção de Tiro Comum: *CS* (do Inglês, “*Common Shot*”)

4. Seção de Receptor Comum: *CR* (do Inglês, “*Common Receiver*”)
5. Seção de Afastamento Nulo: *ZO* (do Inglês, “*Zero Offset*”)

Para uma configuração de Afastamento Comum (Figura 1.1a) a parametrização é dada pela coordenada ζ relativa ao ponto médio entre fonte $S(\zeta)$ e receptor $G(\zeta)$. Em outras palavras,

$$S(\zeta) = \zeta - h \quad \text{e} \quad G(\zeta) = \zeta + h, \quad (1.1)$$

onde $h > 0$ é a metade do meio afastamento entre a fonte e receptor, ou seja, $h = (G(\zeta) - S(\zeta))/2$ (constante).

Para uma seção de Tiro Comum (Figura 1.1b), onde o conjunto de todos os traços sísmicos tem a mesma fonte, a parametrização é dada por,

$$S(\zeta) = S_0 \text{ (constante)} \quad \text{e} \quad G(\zeta) = \zeta, \quad (1.2)$$

ou seja, ζ representa a posição do receptor.

Uma seção de Receptor Comum, onde o conjunto de todos os traços sísmicos tem o mesmo receptor, é análoga à seção CS. Sua parametrização é dada por,

$$S(\zeta) = \zeta \quad \text{e} \quad G(\zeta) = G_0 \text{ (constante)}, \quad (1.3)$$

ou seja, ζ representa a posição da fonte.

Para uma seção de Ponto Médio Comum (Figura 1.1c), onde o conjunto de todos os traços sísmicos tem o mesmo ponto médio entre fonte e receptor, a parametrização é dada por,

$$S(\zeta) = m - \zeta \quad \text{e} \quad G(\zeta) = m + \zeta \quad (1.4)$$

onde $m = (S(\zeta) + G(\zeta))/2$, é a coordenada constante do ponto médio.

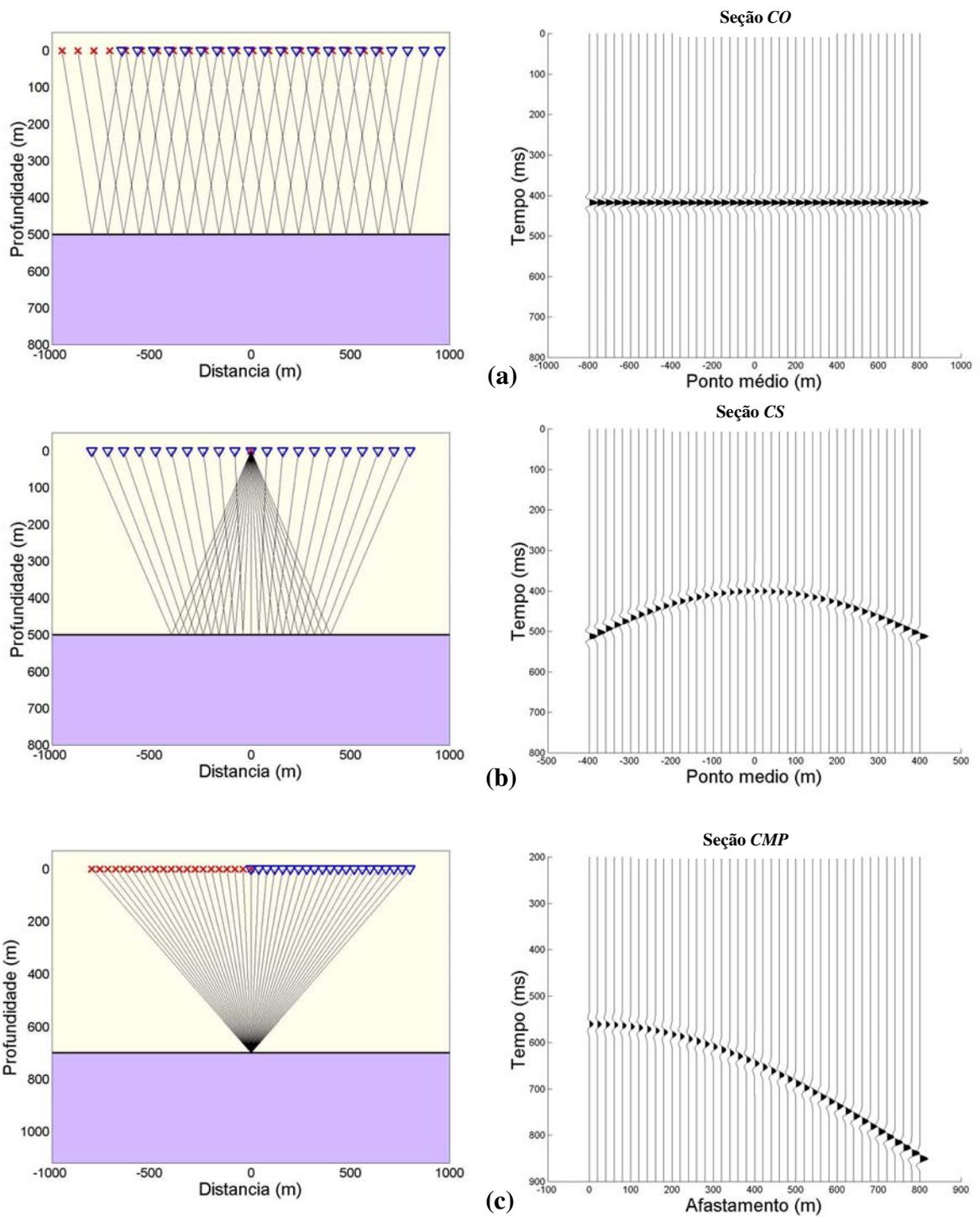


Figura 1.1. Configurações de medida, considerando um meio homogêneo com refletor plano horizontal. (a) Afastamento Comum (CO), (b) Fonte Comum (CS) e (c) Ponto Médio Comum (CMP)

Na prática, a aquisição de dados sísmicos é realizada mediante o deslocamento sucessivo da configuração *CS*, em intervalos iguais ao longo da linha sísmica, fornecendo várias amostragens sucessivas para um mesmo ponto médio comum (cobertura múltipla). A configuração *CMP*, consiste de um igual número de tiros e receptores, dispostos linearmente e de forma simétrica ao ponto ξ , conhecido como pontos médio fonte-receptor. Cada par fonte-receptor registra um único traço sísmico e o conjunto de todos os traços compõe uma família *CMP* (Figura 1.1c). O número de tiros (ou receptores) numa família *CMP* representa o grau de cobertura em subsuperfície.

A seção *CMP* não é obtida em campo (como nas demais configurações); ela é gerada na etapa de processamento sísmico, onde o software utilizado faz um “ordenamento” de todos os traços sísmicos (de diferentes disposições *CS*) que amostraram o mesmo ponto médio comum.

1.2 Tipos de velocidades sísmicas

Em sísmica de reflexão, consagrou-se o uso de alguns termos que designam diferentes tipos de velocidade sísmica. Entre os principais destacam-se velocidade média (V_A), velocidade RMS (V_{RMS}), velocidade *NMO* (V_{NMO}), velocidade de empilhamento (V_{STK}) e velocidade intervalar (V_N). Cada termo genérico de velocidade indica uma situação particular, tanto do modelo adotado quanto da trajetória de propagação do raio.

Na prática, é comum o uso de determinado termo de velocidade em situações que não correspondem as suas especificações. O exemplo mais comum é a confusão no uso dos termos V_{STK} , V_{NMO} e V_{RMS} , os quais são definidos somente no domínio do *CMP*.

O objetivo desta seção é tecer algumas breves considerações sobre cada velocidade, mostrando a definição pela qual são assumidas no presente trabalho.

Velocidade Intervalar (V_N): corresponde à velocidade de propagação de um pulso sísmico em determinado material ou camada geológica. É o principal dado a ser obtido e que caracterizará o meio analisado, possibilitando, deste modo, o cálculo exato das V_A , V_{NMO} e V_{RMS} .

Velocidade Média (V_A): definida como a relação da distância percorrida e o intervalo de tempo correspondente.

Velocidade RMS (V_{RMS}): o uso do termo V_{RMS} restringe a sua utilização a um modelo estratificado construído por camadas com interfaces planas e horizontais. Entre os autores que definiram matematicamente V_{RMS} destacam-se Dix (1955) e Taner e Koehler (1969), que chegaram a resultados idênticos porém seguindo metodologias diferentes para obtenção do mesmo resultado.

Velocidade NMO (V_{NMO}): corrige o aumento de tempo de reflexão relacionado com a distância fonte-receptor. Para um meio horizontalmente estratificado e velocidade variável com a profundidade, a velocidade NMO aumenta com a distância fonte-receptor e é igual a V_{RMS} .

Velocidade STK (V_{STK}): a velocidade de empilhamento (V_{STK}) é a velocidade que melhor horizontaliza uma reflexão sísmica presente em uma família CMP , quando da aplicação da correção de NMO .

1.3. Plano geral da dissertação

No Capítulo 2, é apresentada a Fórmula Hiperbólica do tempo de trânsito, que é a base para todos os métodos abordados nesta dissertação, e pode ser vista como o polinômio de Taylor de segunda ordem para o quadrado da função tempo de trânsito.

No Capítulo 3, é abordado o método de Análise de Velocidades (do Inglês “*Velocity Analysis*”), as teorias do Método de Empilhamento CMP bem como a do Método de Empilhamento Multiparamétrico CRS , e suas incorporações à seqüência de processamento sísmico com vistas à prospecção e monitoramento de reservatórios de hidrocarbonetos.

Um estudo detalhado sobre a obtenção do modelo de velocidades pelo método CRS é descrito no Capítulo 4. Também são retratados neste capítulo, estudos numéricos dos modelos de velocidades e a comparação dos mesmos com o modelo de velocidades obtido pelo método CMP .

Por fim, no Capítulo 5, são apresentados os resultados e conclusões.

Capítulo 2

Tempos de Trânsito

Distintas combinações geométricas entre fonte e receptor podem ser utilizadas para mapear as reflexões provenientes de uma mesma interface, através de diferentes trajetórias das ondas sísmicas, proporcionando cobertura múltipla, ou seja, redundância de amostragem do domínio do espaço. Assim, traços originários de um mesmo “ponto” refletor podem ser corrigidos no domínio do tempo, em função de serem correspondentes a canais registrados com diferentes distâncias (espaçamentos) à fonte e, portanto, com distintos tempos de registro.

O chamado *tempo de trânsito* é o tempo de registro de um evento relativo a uma reflexão primária na interface geológica. Considerando um raio que se propagou desde uma fonte S até um receptor G , refletido em um ponto R do refletor, podemos escrever o tempo de trânsito em função do ponto médio, $\xi=(G+S)/2$, e meio afastamento, $h=(G-S)/2$. Considerando a expansão de Taylor em torno de um certo raio normal, equivalente ao raio da onda NIP^* , arbitrariamente fixado em $\xi=\xi_0$ (veja Figura 2.1).

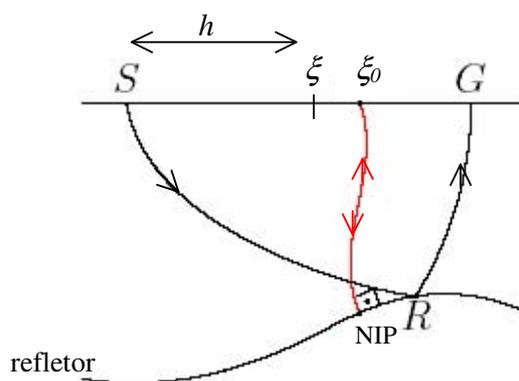


Figura 2.1. Configuração física de uma reflexão primária.

*onda NIP : definida como aquela que começa como uma fonte pontual no ponto NIP , e viaja para cima com a metade da velocidade do meio.

Para simular o tempo de trânsito de um raio vizinho ao raio normal que chega em ξ_0 , fazemos um desenvolvimento de Taylor de segunda ordem ao redor do ponto $(\xi, h) = (\xi_0, 0)$,

$$T(\xi, h) \approx T(\xi_0, 0) + \frac{\partial T}{\partial \xi} (\xi - \xi_0) + \frac{\partial T}{\partial h} h + \frac{1}{2} \left[\frac{\partial^2 T}{\partial \xi^2} (\xi - \xi_0)^2 + \frac{\partial^2 T}{\partial h^2} h^2 + 2 \frac{\partial T}{\partial h \partial \xi} (\xi - \xi_0) h \right], \quad (2.1)$$

onde todas as derivadas indicadas são calculadas em $(\xi_0, 0)$.

Devido ao princípio da reciprocidade, isto é, devido a permuta das posições ocupadas pela fonte e pelo receptor não alterar o tempo de registro, podemos considerar o tempo $T(\xi, h)$ como uma função par em h e, portanto,

$$\frac{\partial T}{\partial h} = \frac{\partial^2 T}{\partial h \partial \xi} = 0. \quad (2.2)$$

Assim, obtemos a fórmula parabólica da aproximação do tempo de trânsito,

$$T(\xi, h) \approx T(\xi_0, 0) + \frac{\partial T}{\partial \xi} (\xi - \xi_0) + \frac{1}{2} \left[\frac{\partial^2 T}{\partial \xi^2} (\xi - \xi_0)^2 + \frac{\partial^2 T}{\partial h^2} h^2 \right]. \quad (2.3)$$

Elevando os dois lados ao quadrado e eliminando os termos de ordem superior a dois, obtém-se a fórmula hiperbólica,

$$T^2(\xi, h) \approx [T_0 + A(\xi - \xi_0)]^2 + B(\xi - \xi_0)^2 + Ch^2, \quad (2.4)$$

onde

$$T_0 = T(\xi_0, 0), \quad A = \frac{\partial T}{\partial \xi}, \quad B = T_0 \frac{\partial^2 T}{\partial \xi^2} \quad \text{e} \quad C = T_0 \frac{\partial^2 T}{\partial h^2}. \quad (2.5)$$

2.1 Tempo de trânsito na configuração *CMP*

Considera-se a situação 2D, em que os pares de fonte e receptor estão situados em uma única linha sísmica, suposta horizontal, e que as variações de velocidades e das estruturas em subsuperfície sejam restritas no plano vertical que contém a linha. O tempo de trânsito para um dado *CMP* com coordenada ξ é um caso particular da aproximação da fórmula hiperbólica (2.4), pois neste caso analisa-se o ponto $\xi = \xi_0$. Portanto, a equação de tempo de trânsito na configuração *CMP* é da forma

$$T^2(\xi, h) \approx T_0^2 + Ch^2, \quad (2.6)$$

onde o termo C está relacionado com a chamada velocidade *NMO*,

$$C = \frac{4}{V_{NMO}^2}. \quad (2.7)$$

Para cada evento selecionado, a correspondente velocidade *NMO* é estimada no processo conhecido na literatura como Análise de Velocidades, assunto tratado no Capítulo 3.

Para ilustrar a validade da Equação (2.6), a qual representa a aproximação hiperbólica de segunda ordem do tempo de trânsito ao longo do raio refletido que conecta o par fonte-receptor (S, G), da família *CMP* na posição ξ , pode-se considerar o uso particular de um refletor plano em um meio homogêneo com velocidade constante, V_0 , e dois percursos de raio (Figura 2.2). Um deles é gerado no ponto S , refletido em uma interface de profundidade igual a Z e registrado na superfície no ponto G distanciado $2h$ de S , o outro raio é incidido perpendicularmente à interface e, portanto, retorna para a superfície na mesma posição que partiu, percorrendo uma distância equivalente a duas vezes a profundidade da camada.

O tempo de percurso para cada um dos raios descritos acima são, respectivamente, iguais a

$$T(\xi, h)^2 = T_0^2 + \frac{4h^2}{V_0^2} \quad (2.8)$$

e

$$T_0 = \frac{2Z}{V_0}. \quad (2.9)$$

A Equação (2.8) corresponde à equação de uma hipérbole no plano h - T . Obtendo neste caso,

$$C = \frac{4}{V_0^2}.$$

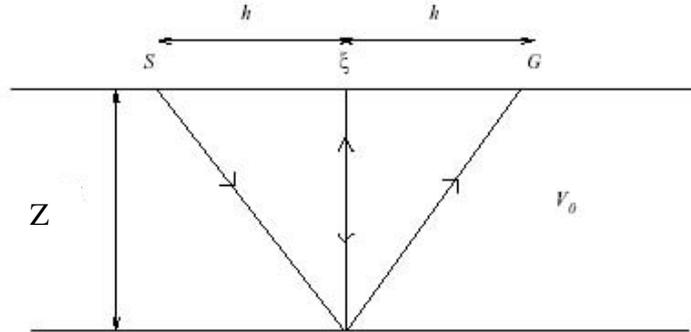


Figura 2.2 Modelo de interface plana horizontal em um meio homogêneo.

A Equação (2.6) também é válida para o caso de modelos com camadas horizontalmente estratificadas e velocidades constantes (Figura 2.3). O tempo de trânsito referente à reflexão da N -ésima interface, como descrito em Dix (1955), é aproximadamente dado por

$$T^2(\xi, h) \approx T_0^2 + \frac{4h^2}{V_{RMS}^2}, \quad (2.10)$$

onde V_{RMS} é a velocidade quadrática média definida como

$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T_0} \sum_{i=1}^N V_i^2 \Delta T_i} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N Z_i V_i}{\sum_{i=1}^N \frac{Z_i}{V_i}}}, \quad (2.11)$$

onde V_i é a velocidade da camada i e ΔT_i é o tempo de trânsito vertical em cada camada, isto é,

$$\Delta T_i = \frac{2Z_i}{V_i} \quad (2.12)$$

e

$$T_0 = 2 \sum_{i=1}^N \frac{Z_i}{V_i}. \quad (2.13)$$

Neste caso, temos $C = \frac{4}{V_{RMS}^2}$.

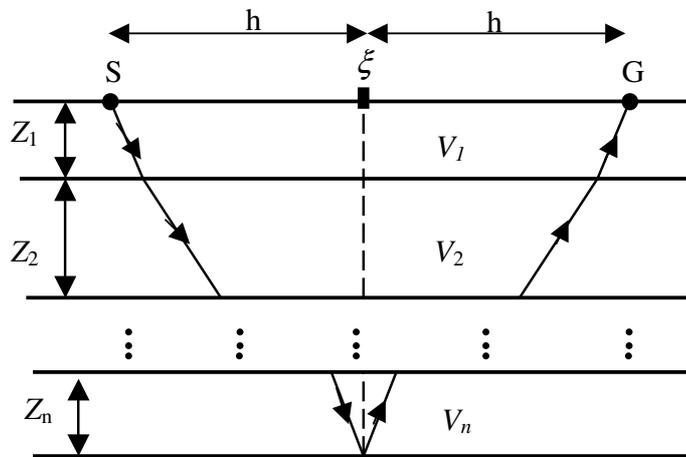


Figura 2.3 Modelo de camadas planas horizontais.

Como vimos, a metodologia da configuração *CMP* é descrita por uma equação matemática simples, dependente apenas de um único parâmetro (velocidade *NMO*) se considerarmos T_0 conhecido.

2.2 Tempo de trânsito geral

Os métodos *CMP* e *CRS* se distinguem no número de parâmetros utilizados para reescrever o tempo de trânsito de um evento sísmico.

O método *CRS* é conduzido pela Equação (2.4) e, além de utilizar muito mais informações que o método *CMP*, é independente de um modelo de velocidade, pois os três coeficientes A , B e C dependem somente do raio normal que se quer simular. Esses coeficientes se relacionam com os parâmetros *CRS*: β , R_N e R_{NIP} (Hubral, 1983).

Os parâmetros *CRS* são definidos para cada posição ZO , ξ_0 , e tempo de trânsito T_0 . O parâmetro β é o ângulo que o raio central de afastamento nulo faz com a normal da superfície em ξ_0 e, R_N e R_{NIP} são os raios de curvatura das ondas N e NIP respectivamente (veja Figura 2.4). Como descrito em Hubral (1983), a onda NIP é definida como aquela que começa como uma fonte pontual no ponto NIP , e viaja para cima com a metade da velocidade do meio sendo registrada em ξ_0 . A onda N é uma onda fictícia onde sua curvatura coincide com a curvatura do refletor no ponto NIP e viaja para cima com a metade da velocidade do meio. Lembrando que o ponto NIP é aquele definido como o ponto de incidência do raio normal ao refletor que emerge em ξ_0 .

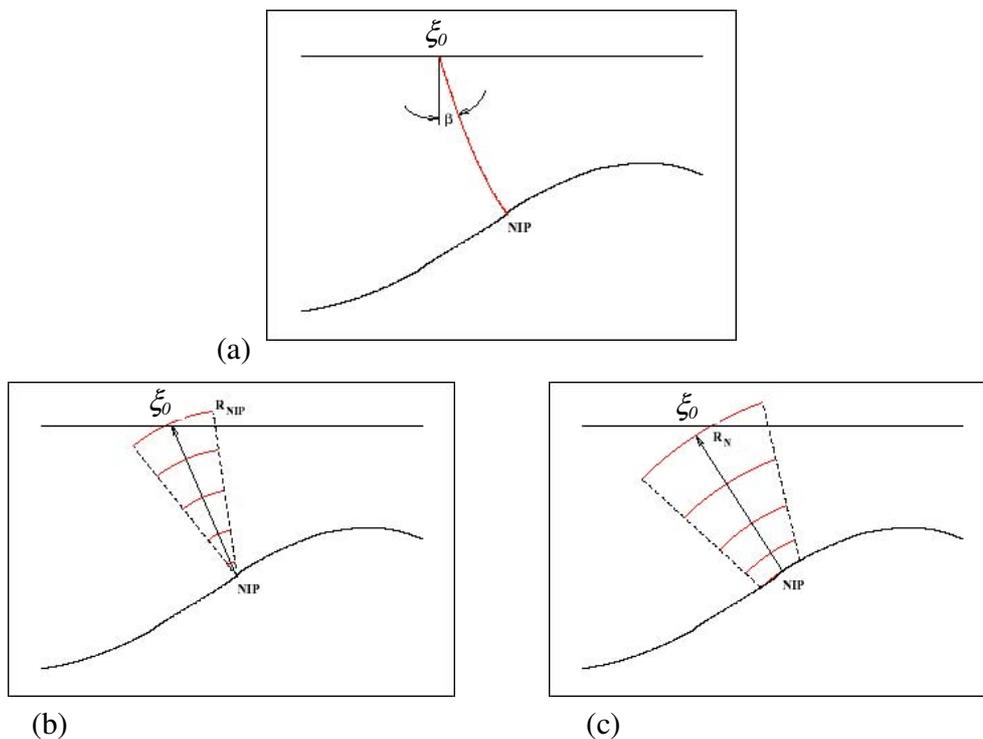


Figura 2.4. Ilustração teórica dos parâmetros *CRS*: (a) ângulo de emergência β , (b) raio de curvatura da onda NIP e (c) raio de curvatura da onda N .

As curvaturas das ondas N e NIP se relacionam, respectivamente, com os coeficientes B e C da Equação (2.4), enquanto que o ângulo de incidência β se relaciona com o coeficiente A da mesma equação, da seguinte forma

$$A = \frac{2 \sin \beta}{v_0}, \quad B = \frac{2T_0 \cos^2 \beta}{v_0 R_N} \quad \text{e} \quad C = \frac{2T_0 \cos^2 \beta}{v_0 R_{NIP}}, \quad (2.14)$$

onde v_0 é a velocidade da superfície na vizinhança do ponto central. Embora v_0 seja supostamente conhecida, na prática, os produtos do método *CRS* são os coeficientes A , B e C .

A Fórmula Hiperbólica do tempo de trânsito para o método *CRS* é obtida a partir da substituição de (2.14) em (2.4),

$$T^2(\xi, h) = \left[T_0 + \frac{2 \sin \beta}{v_0} (\xi - \xi_0) \right]^2 + \frac{2T_0 \cos^2 \beta}{v_0} \left[\frac{(\xi - \xi_0)^2}{R_N} + \frac{h^2}{R_{NIP}} \right]. \quad (2.15)$$

A equação (2.15) simplifica-se em configurações particulares de pares fonte-receptor. As simplificações mais usuais são:

Ponto médio comum (CMP): se o ponto médio for fixo e coincidir com o ponto central, a expressão para o tempo de trânsito pode ser obtida impondo-se a condição $\xi = \xi_0$ em (2.15). Assim, encontramos a expressão, dependente apenas de um parâmetro e que é exatamente a Equação (2.6),

$$T_{CMP}^2(h; \beta, R_{NIP}) = T_0^2 + Ch^2 = T_0^2 + \left[\frac{2T_0 \cos^2 \beta}{v_0 R_{NIP}} \right] h^2. \quad (2.16)$$

Podendo então identificar a V_{NMO} ,

$$V_{NMO} = \sqrt{\frac{4}{C}} = \sqrt{\frac{2v_0 R_{NIP}}{T_0 \cos^2 \beta}}. \quad (2.17)$$

Afastamento nulo (ZO): para obter o tempo de trânsito para afastamento nulo basta substituir $h=0$ em (2.15). Assim, apenas os parâmetros β e R_N regem a fórmula,

$$T_{ZO}^2(\xi; \beta, R_N) = \left[T_0 + \frac{2 \sin \beta}{v_0} (\xi - \xi_0) \right]^2 + \frac{2T_0 \cos^2 \beta}{v_0} \left[\frac{(\xi - \xi_0)^2}{R_N} \right]. \quad (2.18)$$

Fonte comum (CS): impondo que a posição da fonte comum coincida com a posição do ponto central, a expressão do tempo de trânsito para esta configuração é obtida com a condição de que $h = \xi - \xi_0$. Desta forma (2.15) simplifica-se para a equação, dependente de β , R_N e R_{NIP} .

$$T_{CS}^2(h; \beta, R_N, R_{NIP}) = \left(T_0 + \frac{2h \sin \beta}{v_0} \right)^2 + \frac{2T_0 \cos^2 \beta}{v_0} h^2 \left(\frac{1}{R_N} + \frac{1}{R_{NIP}} \right). \quad (2.19)$$

Afastamento comum (CO): como nesta configuração o afastamento entre fonte e receptor é mantido fixo, a expressão para o tempo de trânsito é a própria equação (2.15), porém com a ressalva de que h é constante.

Capítulo 3

Análise de Velocidades

A determinação de velocidades a partir dos dados sísmicos constitui uma etapa básica para o imageamento sísmico do arcabouço estrutural em subsuperfície. A qualidade do resultado da migração é em grande parte dependente da estimativa do campo de velocidade. A estimativa correta da velocidade é fundamental para que os dados sejam imageados adequadamente na migração, uma vez que a utilização de velocidade incorreta faz com que os eventos, além de mal posicionados, fiquem sobre ou submigrados, deteriorando severamente a seção final com a introdução de falsas estruturas e atenuação dos verdadeiros eventos.

A análise de velocidades, *VELAN* (do Inglês, “*Velocity Analysis*”), é uma etapa crítica no processamento sísmico, pois é de vital importância para a etapa do empilhamento. Nessa fase são determinadas as velocidades a serem adotadas para a realização do empilhamento. Todos os métodos de análise de velocidade normalmente realizados tratam-se de procedimentos de modelagem direta, onde os valores de velocidades são sistematicamente testados na seção ou agrupamento de traços.

A *VELAN* fornece a velocidade de empilhamento que, tomada como a de *RMS* (Al-Chalabi, 1974), permite a determinação do modelo de velocidades. Esta consideração ocasiona erro na determinação da velocidade intervalar devido, principalmente, à discrepância dos valores com a variação das características de estratificação e com o afastamento. A técnica tem a limitação de ser exata apenas em modelos de camadas planas horizontais.

Para o estudo em questão (*VELAN*) a função semblance é a medida de coerência mais usada para dados de cobertura múltipla. Caracteriza-se por ajustar uma hipérbole definida pelas Equações (2.4) e (2.6), respectivamente métodos *CRS* e *CMP*, nos eventos de reflexões. Fisicamente a função semblance mede a relação entre a energia do sinal resultante do empilhamento com respeito à energia total antes do empilhamento.

Na Figura 3.1, podemos ver alguns exemplos de diferentes velocidades para o ajuste dos eventos de reflexão utilizando a configuração *CMP* (Equação (2.6)).

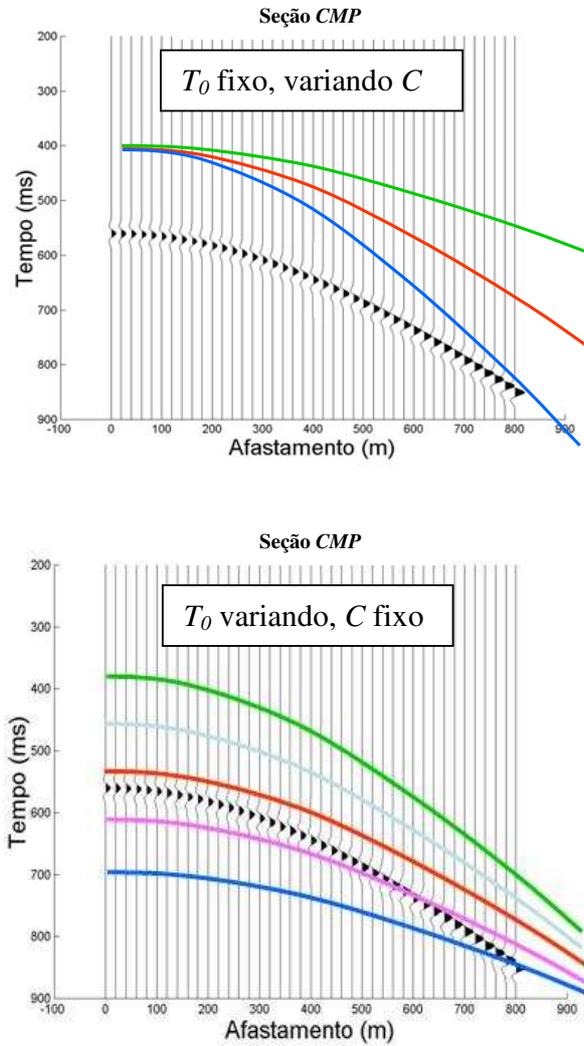


Figura 3.1. Exemplos do comportamento da hipérbole segundo variações de T_0 e C (Equação (2.6)).

Para traços vizinhos ao ponto ξ_0 onde queremos simular o traço de afastamento nulo, podemos considerar que a amplitude do evento considerado é praticamente constante. Denotando as amostras sobre a hipérbole que descreve o tempo de trânsito de uma seção sísmica por $u_i = u(h_i, T(h_i))$, onde $i=1,2,\dots,N$ e h_i e $T(h_i)$ representam respectivamente os traços e os tempos. O cosseno do ângulo entre o vetor u e $e=(1,1, \dots,1)$ é dado por (veja Figura 3.2),

$$\cos \theta = \frac{\sum_{i=1}^N 1 \cdot u_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^N 1^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N u_i^2}} = \frac{\sum_{i=1}^N u_i}{\sqrt{N} \sqrt{\sum_{i=1}^N u_i^2}}, \quad (3.2)$$

onde N é o número de traços da seção *CMP*.

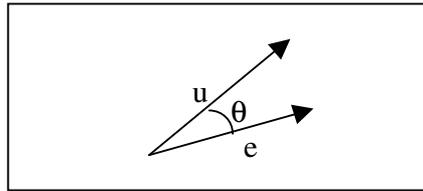


Figura 3.2 Ângulo entre u e e .

Matematicamente a função semblance é definida pelo quadrado da Equação (3.2) (Taner & Koehler, 1969),

$$S = \frac{\left(\sum_{i=1}^N u_i \right)^2}{N \sum_{i=1}^N u_i^2}. \quad (3.3)$$

Considerando uma janela temporal (w) para melhor seleção do sinal de interesse (como ilustrado na Figura 3.3), reformulamos a função semblance para

$$S = \frac{\sum_{k=-w/2}^{w/2} \left(\sum_{i=1}^N u(h_i, T(h_i) + k) \right)^2}{\sum_{k=-w/2}^{w/2} N \sum_{i=1}^N u^2(h_i, T(h_i) + k)}, \quad (3.3)$$

onde k representa a discretização de janela ao redor de $T(h_i)$.

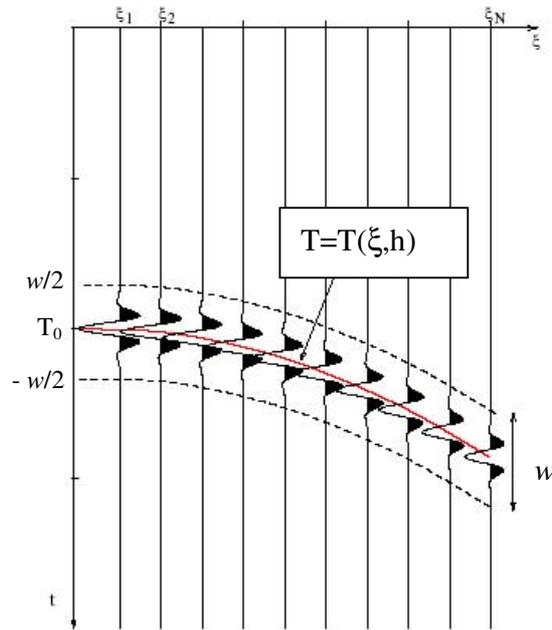


Figura 3.3. Princípio da função semblance.

Quanto mais os tempos aproximados coincidirem com os valores reais, mais a função S se aproxima do seu valor máximo. Como a semblance está normalizada com respeito ao número de canais N , os valores estão no intervalo $[0,1]$.

A função semblance estabelece um critério para identificar os modelos corretos. Quando os tempos calculados coincidem com os tempos de chegada das reflexões das ondas sísmicas, a coerência entre os registros é máxima, pois não existe defasagem da forma de onda do sinal sísmico e conseqüentemente o modelo utilizado é representativo do modelo real.

3.1 Análise de Coerência e Empilhamento *CMP*

O objetivo da análise de coerência *CMP* é encontrar o parâmetro C ou, equivalentemente, V_{NMO} , que melhor ajusta a Equação (2.6) para cada evento sísmico de uma família *CMP*.

Alguns passos podem ser seguidos para a obtenção do parâmetro C :

1. Selecionar famílias *CMP* distribuídas ao longo da linha sísmica. O número de famílias a serem selecionadas é pessoal e visa identificar meios com velocidades lateralmente distintas. Pré-estabelecer um intervalo de velocidades (mínimo e máximo) ou, equivalentemente, um intervalo de parâmetros C , no qual é calculado para cada família e em cada T_0 o valor da Semblance. O valor máximo desse intervalo (parâmetro C) pode ser definido através da Equação (2.6), fixando os valores de T como sendo o tempo total de registro e T_0 como sendo o tempo do primeiro evento sísmico.
2. Os registros corrigidos de *NMO* são empilhados e apresentados lado a lado em um painel.
3. Seguir um certo evento e escolher a velocidade que melhor o horizontaliza e que produz os máximos locais da função coerência (esta é a velocidade *NMO* mais apropriada).
4. Proceder da mesma forma para os outros eventos existentes e assim construir a função velocidade (interpolada linearmente) mais apropriada para este conjunto *CMP* analisado.
5. Passar para o conjunto *CMP* seguinte e repetir os passos de 1 a 4.
6. Interpola-se linearmente essas velocidades *NMO* para conjuntos *CMPs* intermediários aos analisados.

Após obter a velocidade que apresentou o maior valor de semblance para cada evento hiperbólico de reflexão sísmica, pode-se fazer a correção de *NMO* nos dados. A correção *NMO* é a diferença de tempo entre o tempo de percurso $T(h)$ para um determinado afastamento e o tempo de percurso para afastamento nulo T_0 . Tal correção “horizontaliza” os eventos de reflexão e sua expressão é dada por

$$\Delta T_{NMO}(h) = T(h) - T_0 = \sqrt{T_0^2 + Ch^2} - T_0 = T_0 \left[\sqrt{1 + \left(\frac{2h}{T_0 V_{NMO}} \right)^2} - 1 \right]. \quad (3.4)$$

Este processo também resulta no chamado *estiramento do NMO*, que é um aumento do intervalo de tempo de um evento de reflexão sísmica (Duarte, 1997). O estiramento do pulso é mais forte em eventos que sofreram maior correção ΔT_{NMO} (veja Figura 3.4).

Posteriormente, empilham-se os traços que não sofreram estiramento gerando um único traço sísmico, o qual simula uma aquisição de afastamento nulo. Esse traço terá a amplitude do evento de reflexão mais evidenciada, uma vez que os ruídos aleatórios foram atenuados com a soma.

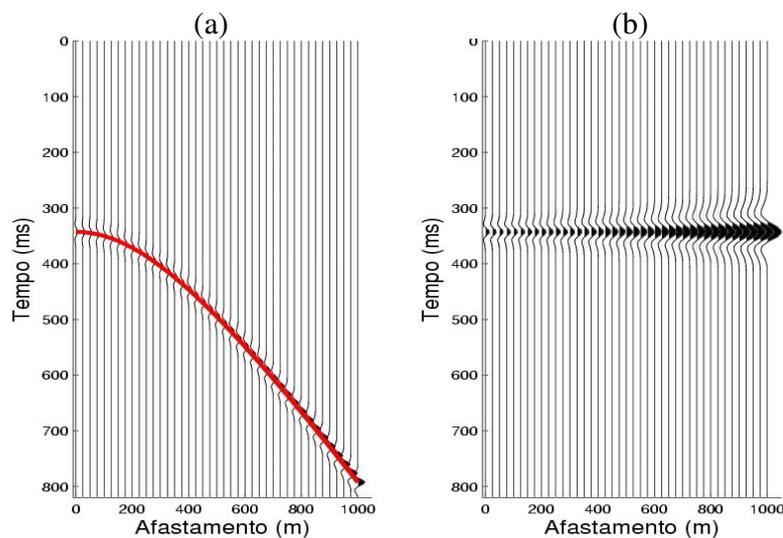


Figura 3.4. Seção *CMP* em (a); eventos horizontalizados após correção *NMO* e estiramento do pulso em (b).

Para exemplificar o conceito de análise de velocidades, apresentamos na Figura 3.5, um modelo geológico constituído por interfaces planas e curvas com camadas homogêneas.

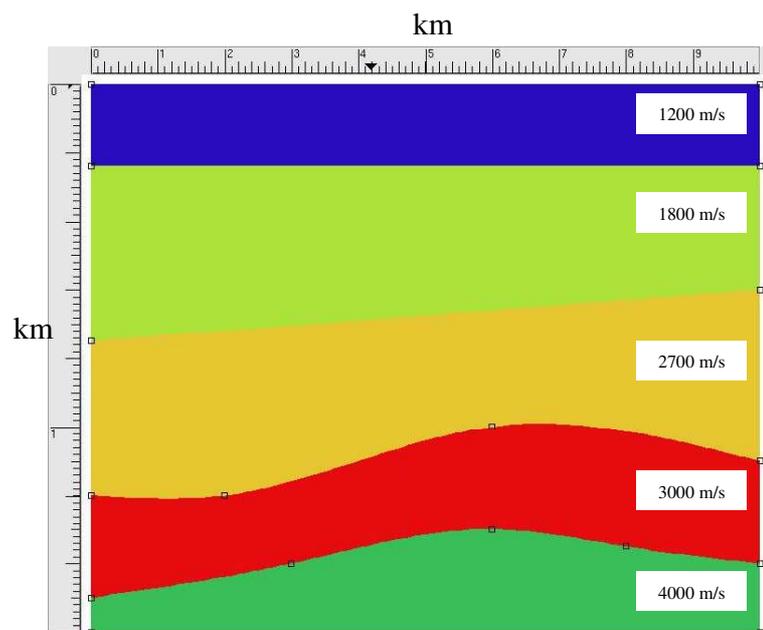


Figura 3.5. Modelo geológico para estudo controlado sobre *VELAN*

A Figura 3.6 ilustra os registros de uma aquisição sísmica na configuração *CS* (do Inglês “*Common Shot*”) de apenas 4 fontes situadas nas posições 2, 3, 4 e 5 km do modelo geológico, cada uma delas com 64 receptores. Acrescentou-se ruídos aos dados (Figura 3.7) para atenuar as interferências geradas pela função semblance (Figura 3.8).

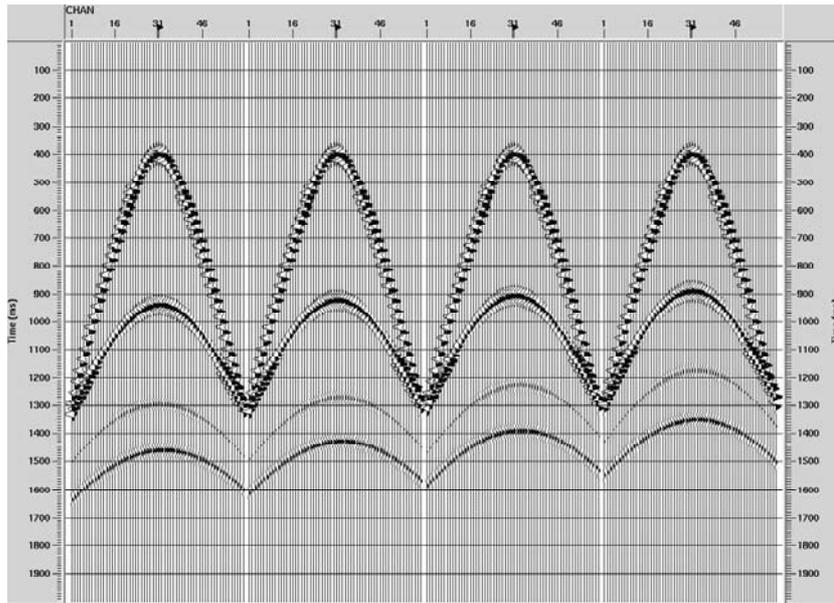


Figura 3.6. Registros sísmicos de conjuntos *CS* nas posições 2, 3, 4 e 5 km do modelo geológico.

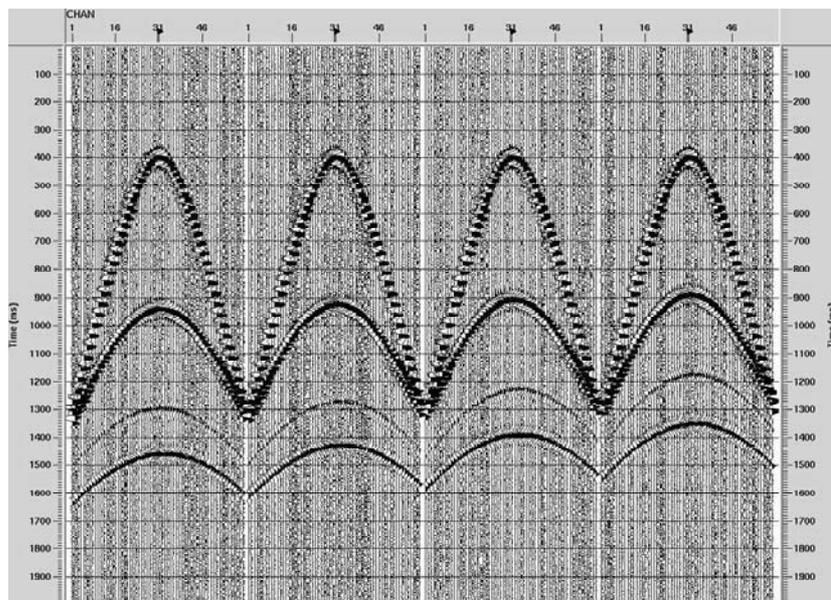


Figura 3.7. Registros sísmicos com ruídos.

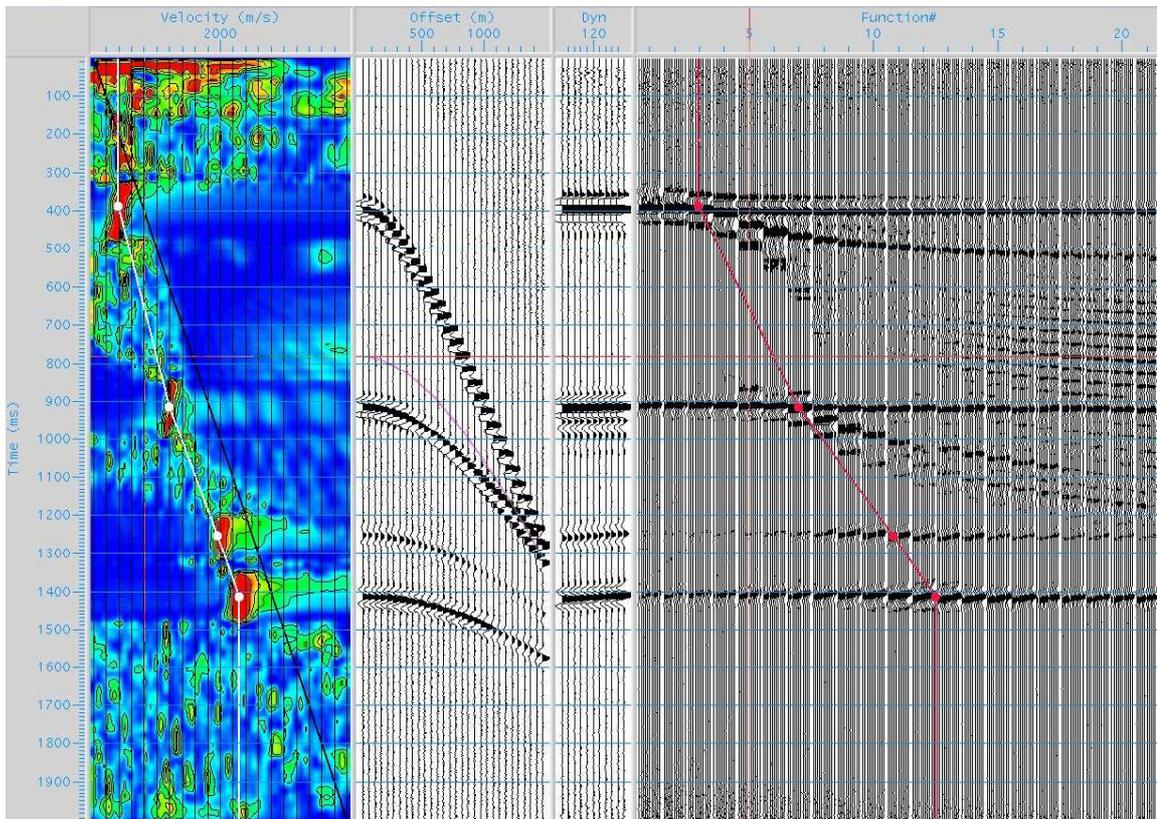


Figura 3.8. Análise de Velocidades para o *CMP* 120.

Na Figura 3.8, temos a *VELAN* referente a um único conjunto *CMP*. Neste caso, o painel de *VELAN* está constituído por quatro sub-painéis, estando o tempo de registro no eixo vertical. No sub-painel da esquerda temos a semblance; no da esquerda-central temos o conjunto *CMP* 120; no sub-painel da direita-central estão apresentados o traço empilhado referente ao *CMP* 120 obtido após correção *NMO* para cada evento, juntamente com os cinco *CMPs* adjacentes; e, por fim, no sub-painel da direita estão ilustrados os mesmos traços empilhados do sub-painel anterior em diversas velocidades pré estabelecidas. Mesmo acrescentando ruído aos dados, nota-se algumas interferências na semblance principalmente do tempo de registro inicial até 300 ms e após 1500 ms. Valores grandes da função semblance indicam um bom ajuste entre a curva definida pela função e o evento de reflexão. Ao selecionar (clique) os valores máximos de Semblance é construído simultaneamente o gráfico da função de velocidades que, é feita por interpolação linear entre os intervalos dos eventos sísmicos. Essa função de velocidades é finalmente aplicada sobre os dados de reflexão para fins de empilhamento.

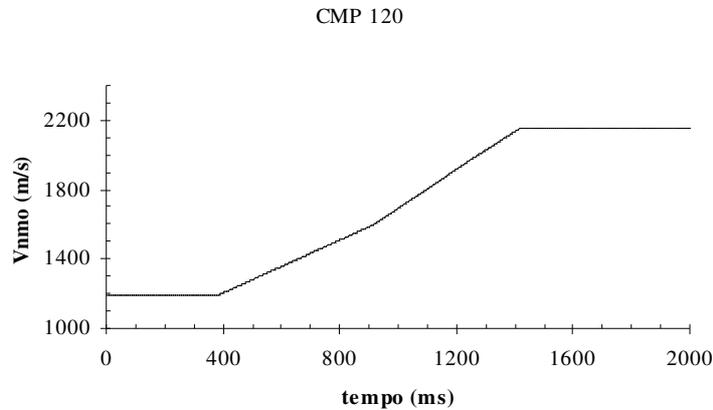


Figura 3.9. Curva de V_{NMO} do *CMP* 120 obtida após análise de velocidades.

Na Figura 3.9 temos a curva de velocidade do *CMP* 120 obtida pela análise de velocidades. Nota-se que entre dois pontos selecionados pelo intérprete (aproximadamente 400 e 900 ms) o programa aplica uma interpolação linear.

3.2 Análise de Coerência e Empilhamento *CRS*

O processo de empilhamento *CRS* está baseado em análise de coerência (neste trabalho utilizamos a *semblance*). Assim, qualquer sinal coerente contido nos dados será empilhado. Dado o ponto central ($\xi = \xi_0, h = 0$), o tempo normal T_0 , e os parâmetros *CRS* (β, R_N, R_{NIP}), o gráfico do tempo de trânsito (2.15) representa uma superfície dentro do volume de dados de multicobertura. Se o ponto $(\xi_0, 0)$, pertence a um evento de reflexão e os parâmetros *CRS* estão corretos para este evento, então o gráfico de (2.15) é, até segunda ordem, tangente ao referido evento. Assim, as amostras ao longo da superfície definida pela equação (2.15) no volume de dados apresentarão coerência e, no empilhamento, irão interferir construtivamente para formar uma imagem. Desta forma, os parâmetros ótimos são aqueles que maximizam a função *semblance*. O ângulo β deve pertencer ao intervalo $(-\pi/2, \pi/2)$ e os raios de curvatura R_N e R_{NIP} podem assumir qualquer valor real.

Na prática, o problema de achar os valores de β, R_N e R_{NIP} não é facilmente solucionável devido à grande quantidade de pontos (ξ, h, T) no volume de dados para os quais deve ser realizado o processo de busca. Portanto, a estratégia para estimar os parâmetros é fazer buscas em

subconjuntos de pontos (ξ, h, T) onde a equação de tempo de trânsito dependa de menos incógnitas.

3.2.1 Busca dos parâmetros CRS

Para buscar aos parâmetros *CRS* na configuração *ZO 2D*, propomos a estratégia descrita por Müller (1999). Esta estratégia visa, numa primeira etapa, obter estimativas iniciais para os parâmetros, através de buscas unidimensionais ou bidimensionais. Essas estimativas são utilizadas como aproximações iniciais para uma segunda etapa, na qual um processo de otimização é empregado para obter os parâmetros ótimos.

A etapa que define o trio de parâmetros iniciais, envolve três passos onde se buscam um parâmetro por vez. O primeiro passo é o chamado *Empilhamento CMP Automático*, que se caracteriza pela estimação do parâmetro combinado q . Utilizando as seções *CMP* extraídas dos dados, ou seja, $\xi = \xi_0$, a Equação (2.15) é então reescrita

$$T_{CMP}^2(h; q) = T_0^2 + \frac{2T_0 h^2 q}{v_0}, \quad (3.5)$$

onde o parâmetro combinado q é dado por

$$q = \frac{v_0 C}{2T_0} = \frac{\cos^2 \beta}{R_{NIP}}. \quad (3.6)$$

Essa busca é similar à análise de velocidades *CMP* convencional. A função semblance é computada sobre as curvas determinadas pela fórmula (3.5), e as seções de afastamento nulo e coerência são então obtidas.

O segundo passo, conhecido como *Busca de Onda Plana* (busca do parâmetro β), é realizado no domínio *ZO* (Equação 2.18). Adotando o conceito de onda plana, ou seja, supondo $R_N = \infty$, a equação (2.18) é reescrita na forma

$$T(\xi; \beta) = T_0 + \frac{2 \sin \beta}{v_0} (\xi - \xi_0). \quad (3.7)$$

Para cada par (ξ_0, T_0) , faz-se uma busca unidimensional para β , entre $-\pi/2$ e $\pi/2$. Obtidos os parâmetros q e β (Passos 1 e 2 respectivamente), pode-se calcular o parâmetro R_{NIP} através da Equação (3.6).

O terceiro e último passo, conhecido como *Busca Hiperbólica* (busca do parâmetro R_N), também é realizado no domínio de afastamento nulo e, portanto, é regida pela equação (2.18). Porém, a inserção do parâmetro β , obtido no passo 2, é necessária.

Uma vez obtidas as aproximações iniciais dos três parâmetros para um dado ponto ZO , é aplicado o empilhamento segundo a Equação (2.4), sendo o seu valor alocado ao ponto (ξ_0, T_0) . A seção assim obtida denomina-se *seção empilhada inicial*, terminologia esta empregada para enfatizar que os parâmetros obtidos através deste procedimento representam primeiras estimativas passíveis de refinamentos.

As estimativas dos termos β , R_{NIP} e R_N , podem ser convenientemente utilizadas como valores iniciais para um processo de otimização envolvendo agora os três parâmetros simultaneamente. Este processo representa um refinamento da busca anterior com vistas a resultados mais precisos para os parâmetros (Figura 3.10 (a), (b) e (c) respectivamente parâmetros β , R_{NIP} e R_N). De posse dos parâmetros refinados, obtém-se o chamado *empilhamento otimizado CRS*.

Alguns métodos de otimização aplicados ao problema de empilhamento são, por exemplo, o de Nelder-Mead (Müller (1999)), o Método do Gradiente Espectral Projetado (SPG) (Birgin et al. (1999)) e Quase-Newton (Garabito (2001)). Neste trabalho, utilizou-se o método de Nelder-Mead, sendo o leitor referido ao trabalho de Müller (1999)

Como vimos, o método *CRS* produz mapas dos parâmetros β , R_{NIP} e R_N (Figura 3.10), bem como a correspondente seção *ZO* simulada (Figura 3.11b) e a seção de coerência (Figura 3.11a). Apresentamos a seguir, a seção otimizada de afastamento nulo simulada proveniente do método *CRS*, a qual podemos compará-la com a clássica seção *ZO* simulada *CMP* (Figura 3.11c), do modelo geológico ilustrado na Figura 3.5.

A seção resultante do empilhamento *CRS* mostra significativa melhoria de qualidade, onde seus refletores são mais evidenciados em relação à seção do empilhamento *CMP*.

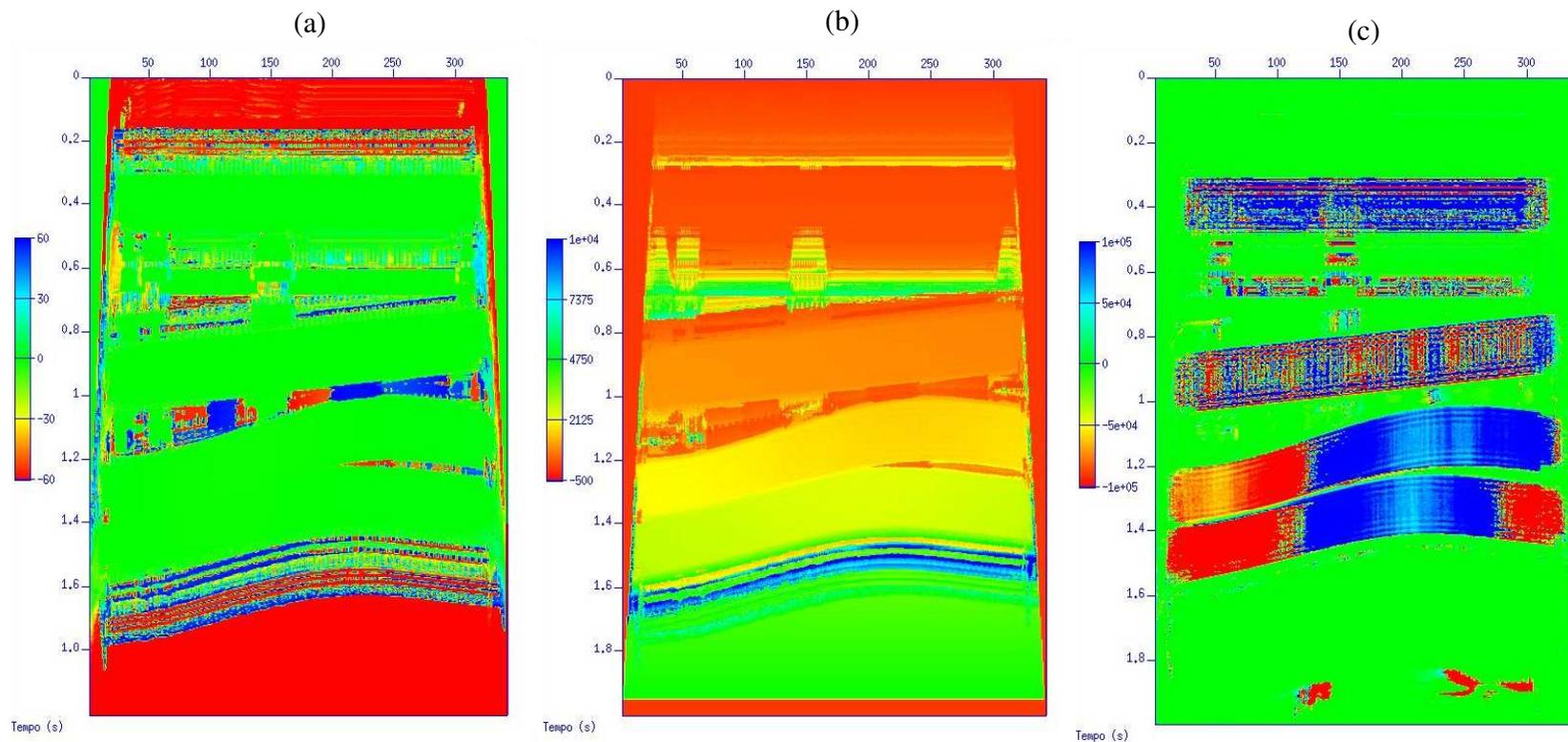


Figura 3.10. Seções dos parâmetros *CRS* otimizados: (a) β , (b) R_{NIP} e (c) R_N .

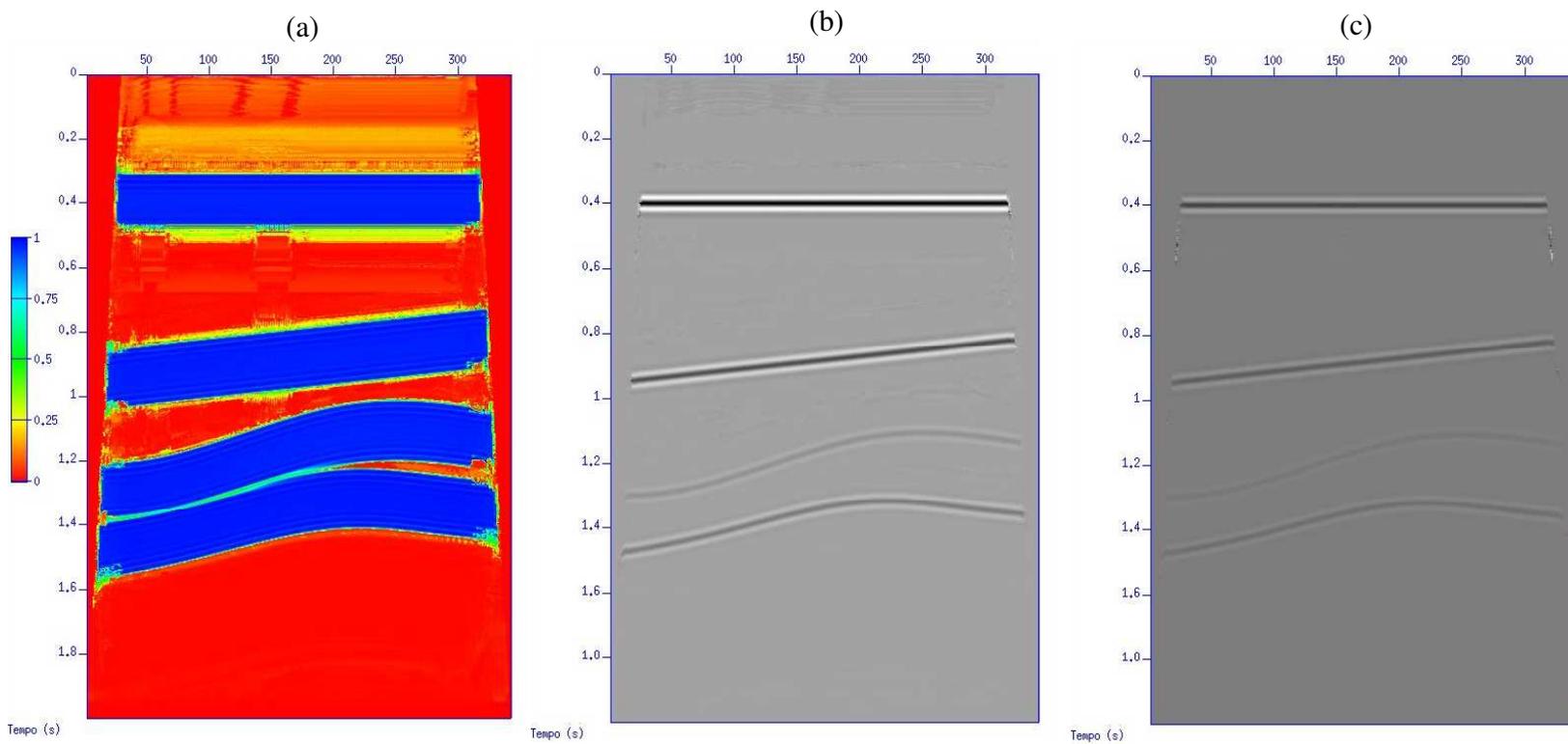


Figura 3.11. Seção de coerência em (a), e seções simuladas de afastamento nulo: (b) método *CRS* (otimizado) e (c) método *CMP*.

Capítulo 4

Experimentos Computacionais

Pelo fato do método *CRS* ser muito recente, não são disponíveis ainda na literatura comparações sistemáticas entre seções provenientes das aplicações dos métodos *CMP* e *CRS*. Desta forma, este trabalho visa prover essa lacuna, demonstrando uma maneira de se obter, pelo método *CRS*, o modelo de velocidades, muito útil para uma variedade de outras tarefas de processamento, imageamento e inversão de dados sísmicos, contribuindo para o crescente uso da tecnologia *CRS*.

4.1. Obtenção de V_{NMO} pelo método *CRS*

De posse dos parâmetros *CRS* e conhecendo v_0 (velocidade na superfície) para cada par (ξ, T_0) podemos encontrar a velocidade *NMO* através da Equação (2.17). Um fluxograma de fácil compreensão que demonstra a estrutura do cálculo de V_{NMO} é exibido na Figura 4.1. Para ilustrar o processo, apresentamos na Figura 4.2a os mapas de velocidades obtido pelos métodos *CMP* e *CRS* do modelo geológico sintético da Figura 3.5.

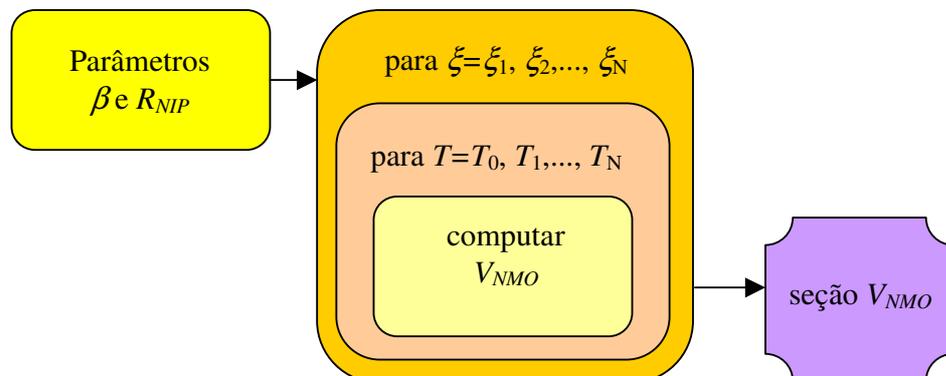


Figura 4.1. Fluxograma para obtenção de V_{NMO} pelo método *CRS*.

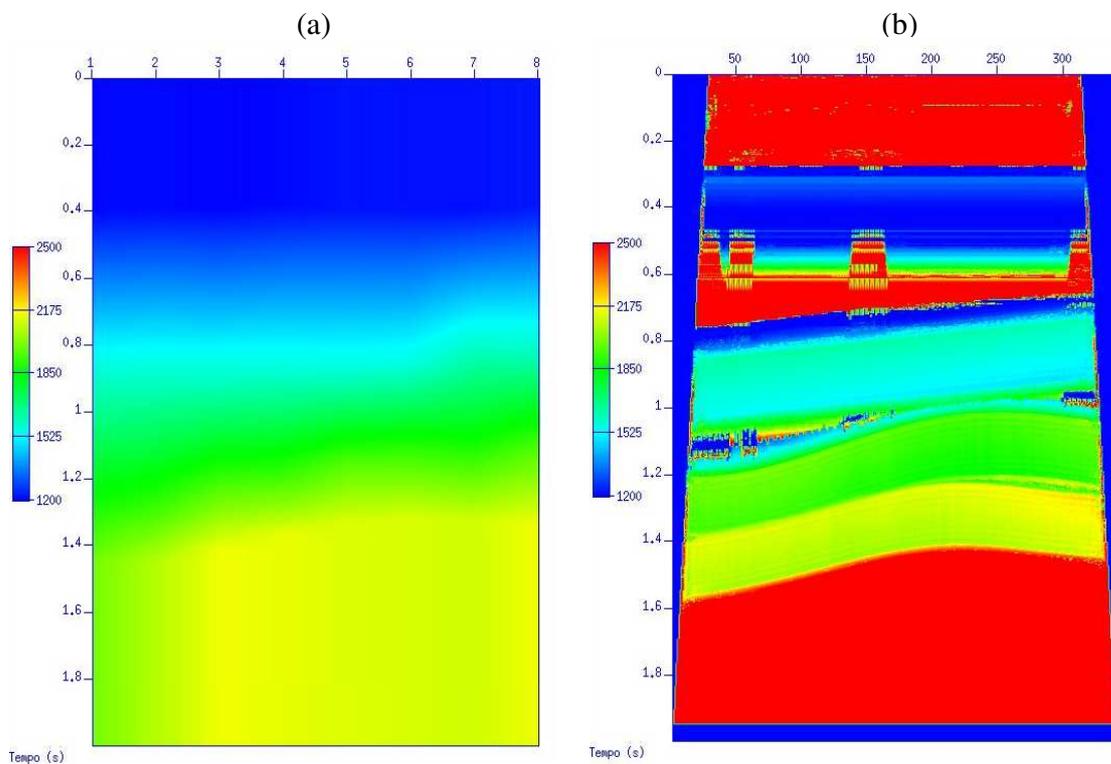


Figura 4.2. Mapas de velocidades (m/s) referentes ao modelo geológico apresentado na Figura 3.5: (a) método *CMP* e (b) método *CRS*.

É válido lembrar que os valores do modelo de velocidades resultante da *VELAN* (Figura 4.2a), estão interpolados linearmente conforme discutido na Seção 3.1 desta Dissertação, e, assim, constituem um painel suave em relação ao mapa de velocidades da Figura 4.2b. Neste trabalho não foram estudados métodos de interpolação, sendo o leitor referido à aplicação de métodos linear, quadrático e outros. A abordagem de uma técnica para suavizar os valores de V_{NMO} , obtidos pela Equação 2.17, é descrita a seguir.

4.2. Análise qualitativa dos experimentos

Com o foco de suavizar os dados de velocidades apresentados na seção da Figura 4.2b, efetuamos um procedimento que priorizou os valores de velocidades nas amostras que possuem alto valor de coerência, eliminando os valores altos de velocidade encontrados no início e no final da seção V_{NMO} , referentes a valores baixos de coerência e considerados como ruídos. Nos

intervalos onde a coerência é relativamente alta, realizamos uma interpolação linear temporal nos dados de velocidades.

De posse da seção de coerência *CRS* bem como da seção V_{NMO} obtida pelos parâmetros *CRS* R_{NIP} e β , podemos para cada ponto ξ , aplicar o seguinte algoritmo:

1. Na seção de coerência, percorrer as amostras temporais e guardar o valor máximo de coerência encontrado (C_M).
2. Percorrer novamente as amostras na seção de coerência e, armazenar as amostras T_j cujo valor de coerência for maior do que uma porcentagem α_1 (corte inferior) pré-estabelecida do valor C_M .
3. Para cada posição T_j selecionar as amostras em $[T_j - m\Delta T, T_j + m\Delta T]$ com $m \geq 1$, tais que o respectivo valor de coerência estiver acima de uma porcentagem α_2 (corte superior) da coerência em T_j . Atribuir a T_j o valor da média aritmética entre as V_{NMO} 's das amostras selecionadas.
4. Através de interpolação linear, atribuir valor de V_{NMO} para todas as amostras temporais.

Para início da análise, avaliamos a eficácia da porcentagem α_1 e α_2 bem como o número de amostras m para efeito de suavização. Para as amostras onde o valor de coerência foi menor do que α_1 do valor encontrado no Passo 1, atribuímos valor nulo de velocidade na posição desta amostra na seção de V_{NMO} .

Na Figura 4.3 apresentamos o modelo de velocidades do método *CMP* (a) e os modelos de velocidades a partir do método *CRS* com α_1 igual a 80%, m igual a 3 e α_2 iguais a 20% (b) e 80% (c).

Notamos assim, que houve uma significativa melhora na definição dos eventos e completa eliminação de interferências nos mapas de velocidades para as condições de 80%, 80% e 3, respectivamente corte inferior, corte superior e número de amostras (Figura 4.3c). Estudos adotando valores superiores a estes não demonstraram nenhuma eficácia. Além disso, podemos nos certificar da semelhança de valores obtidos pelos métodos *CMP* e *CRS*.

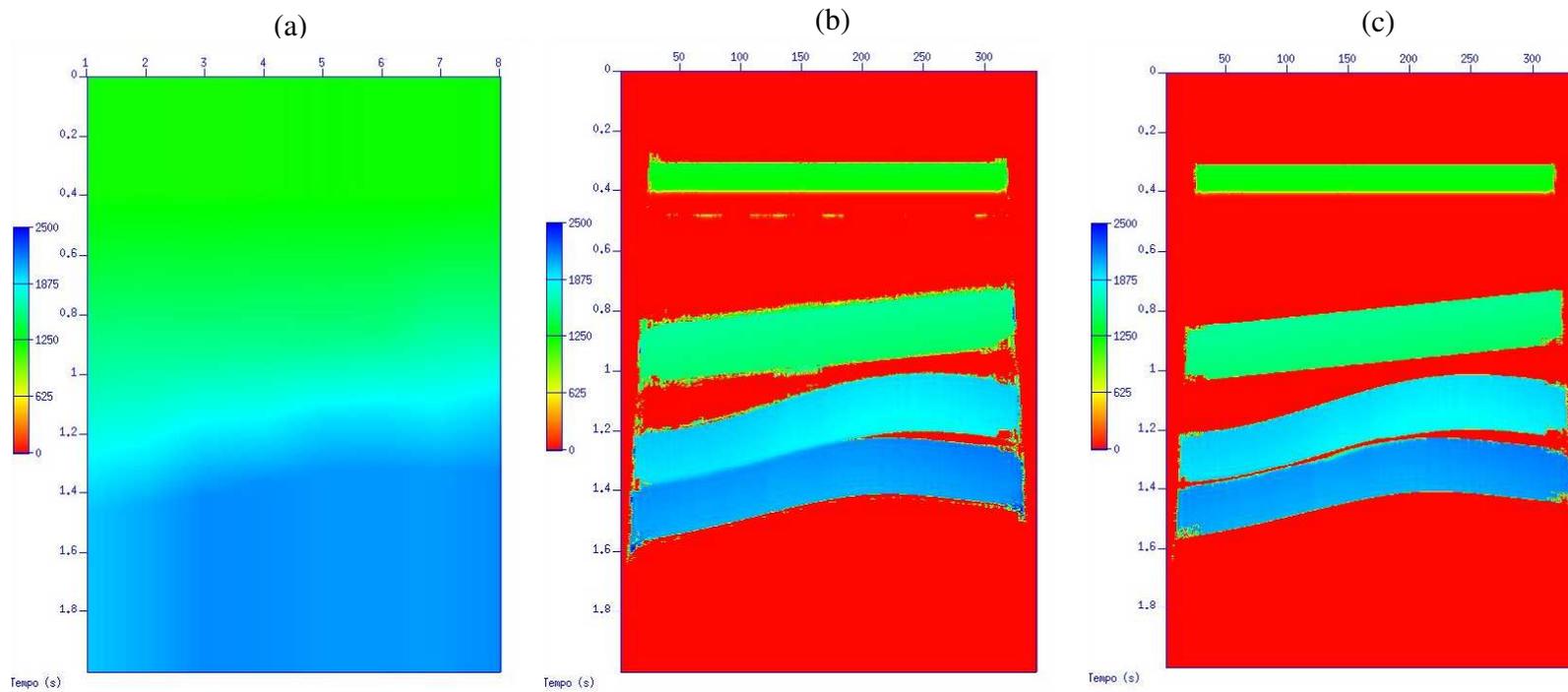


Figura 4.3. Modelo de Velocidades *CMP* (m/s) em (a), e modelos de velocidades *CRS* (m/s): (b) 80% corte inferior - 20% corte superior - 03 amostras de intervalo e (c) 80% - 80% - 03

A estrutura do algoritmo adotado com a tentativa de suavizar as amplitudes dos dados de V_{NMO} , oriundos da Equação (2.17), está descrita no fluxograma da Figura 4.4.

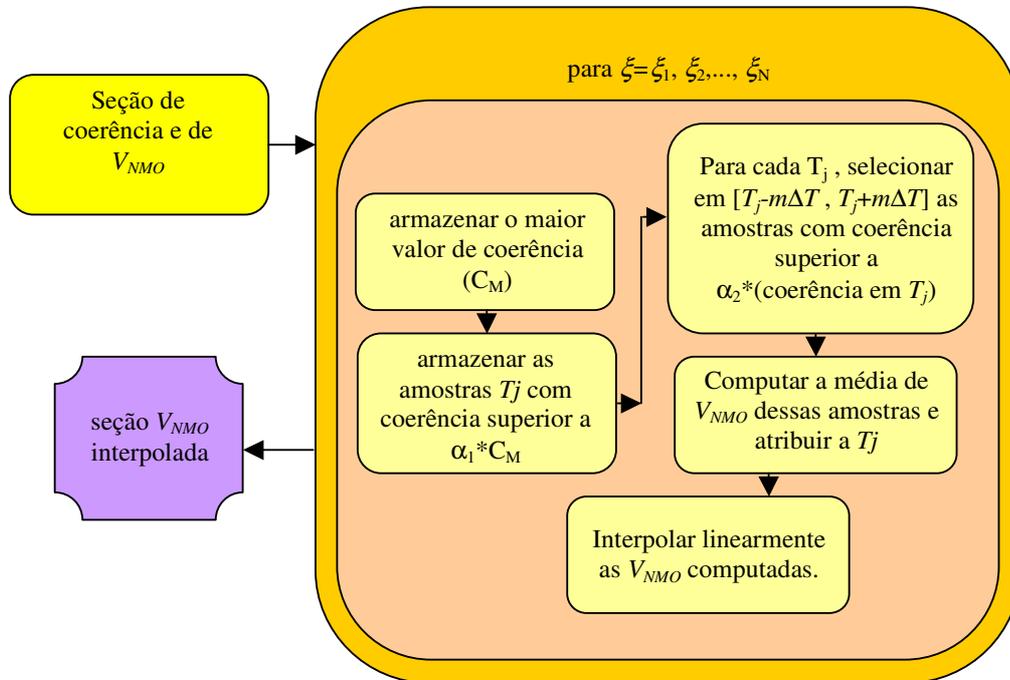


Figura 4.4. Fluxograma para interpolação das amplitudes de velocidade.

De posse da seção V_{NMO} interpolada, executamos um processo de filtragem para suavizar ainda mais as velocidades. O filtro utilizado, aplicável no domínio do tempo, possui operador de suavização de 5 pontos e é baseado na Regra de Quadratura de Simpson,

$$V_n^* = \frac{1}{12} (V_{n-2} + 4V_{n-1} + 2V_n + 4V_{n+1} + V_{n+2}) \quad (4.1)$$

O operador de filtragem demonstrou ótimos resultados quando aplicados repetidamente nos dados.

Na Figura 4.5 apresentamos os modelos de velocidades referentes ao mesmo modelo sintético da Figura 3.5. Para o método *CRS* apresentamos os valores brutos resultantes da Equação (2.17), os valores interpolados e os valores suavizados através da Equação (4.1). É possível notar a ótima performance do algoritmo apresentado no fluxograma da Figura 4.4, onde podemos perceber a eficácia da interpolação nos dados entre os tempos de 0,5 a 1,4 s (Figura 4.5b).

O modelo de velocidades *CRS* suavizado se assemelha ao modelo de velocidades do método *CMP* e, para qualificar tal semelhança, selecionamos os traços referentes aos *CMPs* 40, 160 e 280 dos painéis da Figura 4.5 e os apresentamos graficamente na Figura 4.6. Ressaltamos que a curva de velocidade do método *CMP* está em preto, a curva do método *CRS* bruto está em verde, em azul está a curva do método *CRS* interpolado e em vermelho a curva suavizada.

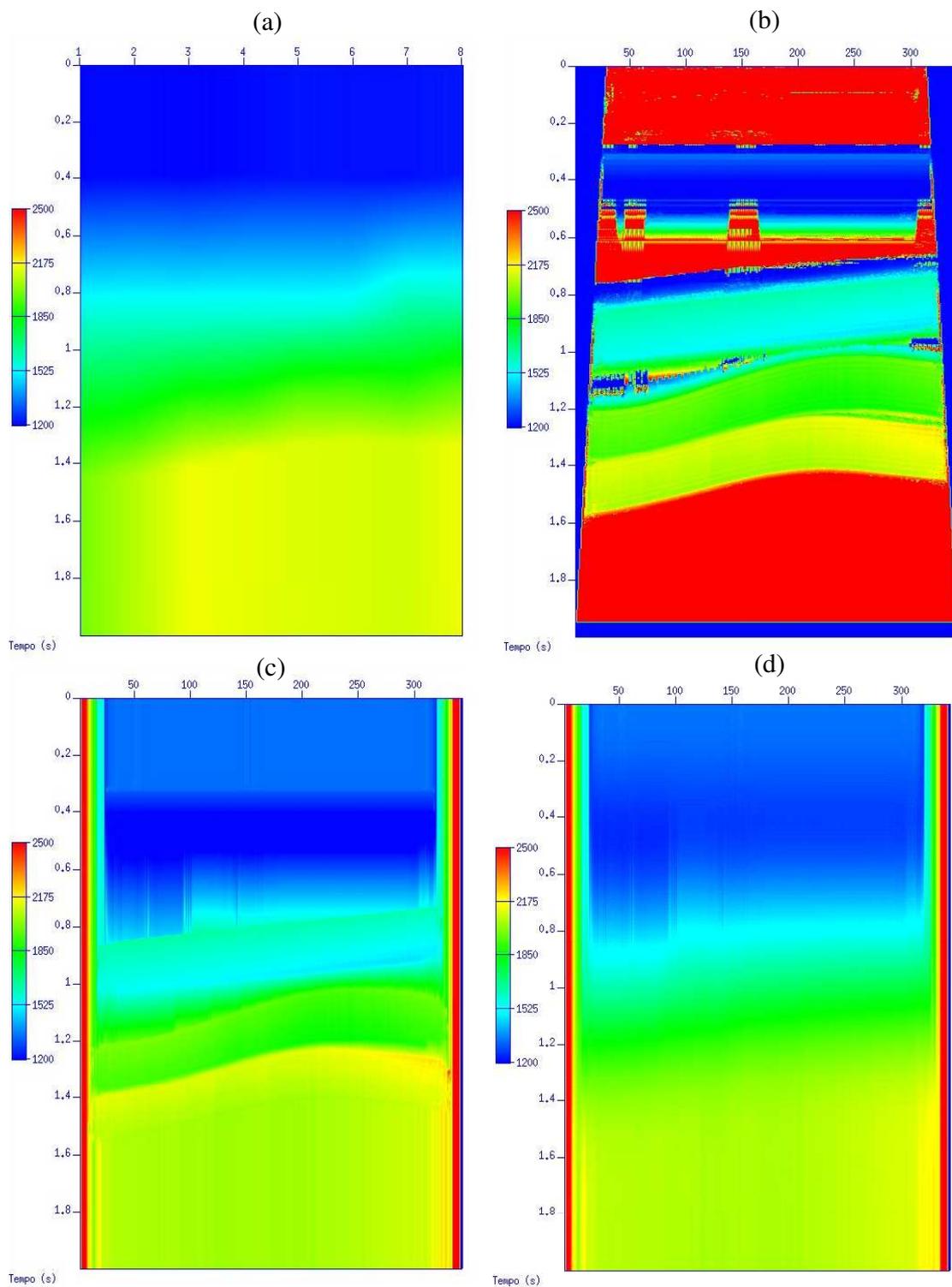


Figura 4.5. Modelos de velocidades (m/s) do modelo sintético: (a) *CMP*, (b) *CRS* bruto, (c) *CRS* interpolado e (d) *CRS* suavizado.

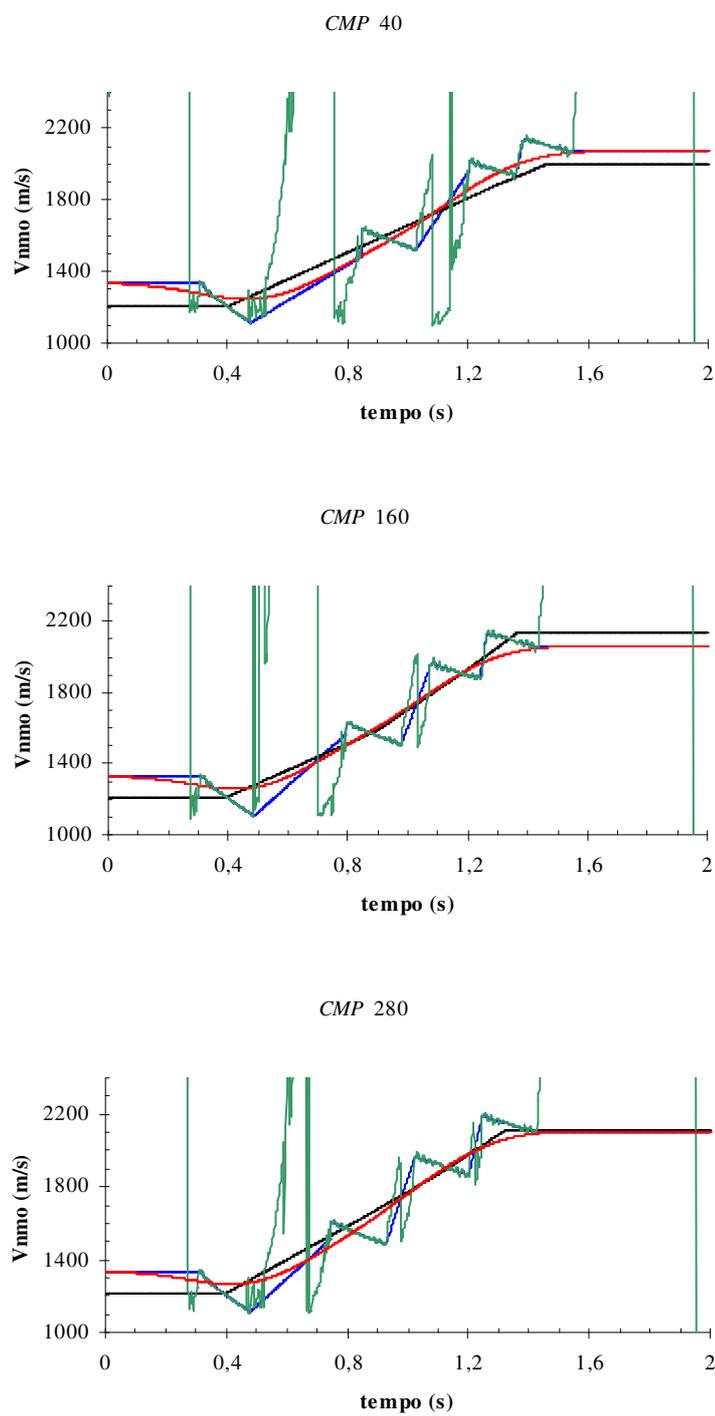


Figura 4.6. Curvas de velocidades do dado sintético para os *CMPs* 40, 160 e 280. Método *CMP* (em preto), *CRS* bruto(em verde), *CRS* interpolado (em azul) e *CRS* suavizado (em vermelho).

As curvas de velocidade do método *CRS* se iniciam, nos três *CMPs* analisados, Figuras 4.6 (a), (b) e (c), com valores superiores ao esperado, uma vez que o modelo geológico (Figura 3.5) possui velocidade inicial, v_0 , igual a 1200 m/s.

O procedimento de filtragem, aplicado aos dados, fornece maior suavização quanto maior o número de aplicações do filtro. Desta forma, aplicamos o filtro o dobro de vezes em relação ao modelo da Figura 4.5d no dado interpolado. Nas Figuras 4.7 exibimos, respectivamente, os painéis da diferença de velocidades entre o dado interpolado e o suavizado em (a) e o dobro da suavização em (b). As curvas de velocidades para as duas suavizações dos respectivos *CMPs* selecionados na Figura 4.6, estão exibidas na Figura 4.8, lembrando que em preto estão apresentadas as curvas do método *CMP*, e em vermelho as curvas dos dados suavizados o dobro de vezes das curvas em azul. Comparando as curvas, notamos que a diferença entre número de iterações não foi significativa para alterar o modelo de velocidades.

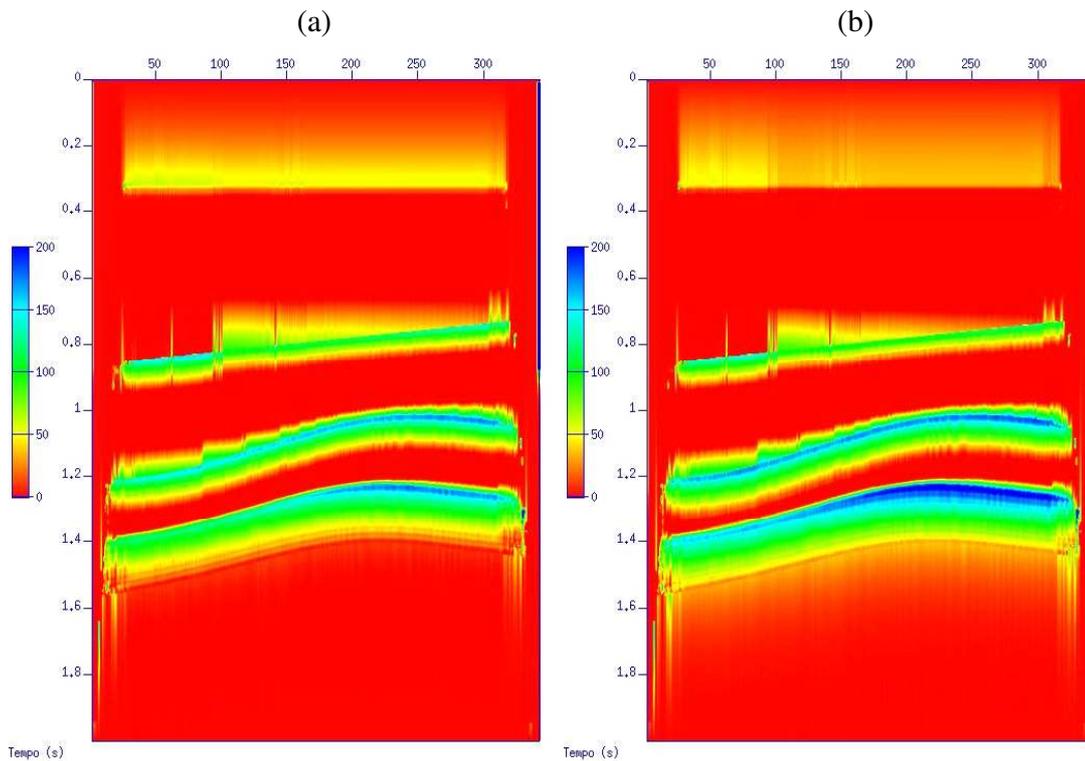


Figura 4.7. Painéis da diferença entre o dado interpolado e o dado suavizado em (a) e o dobro da suavização em (b).

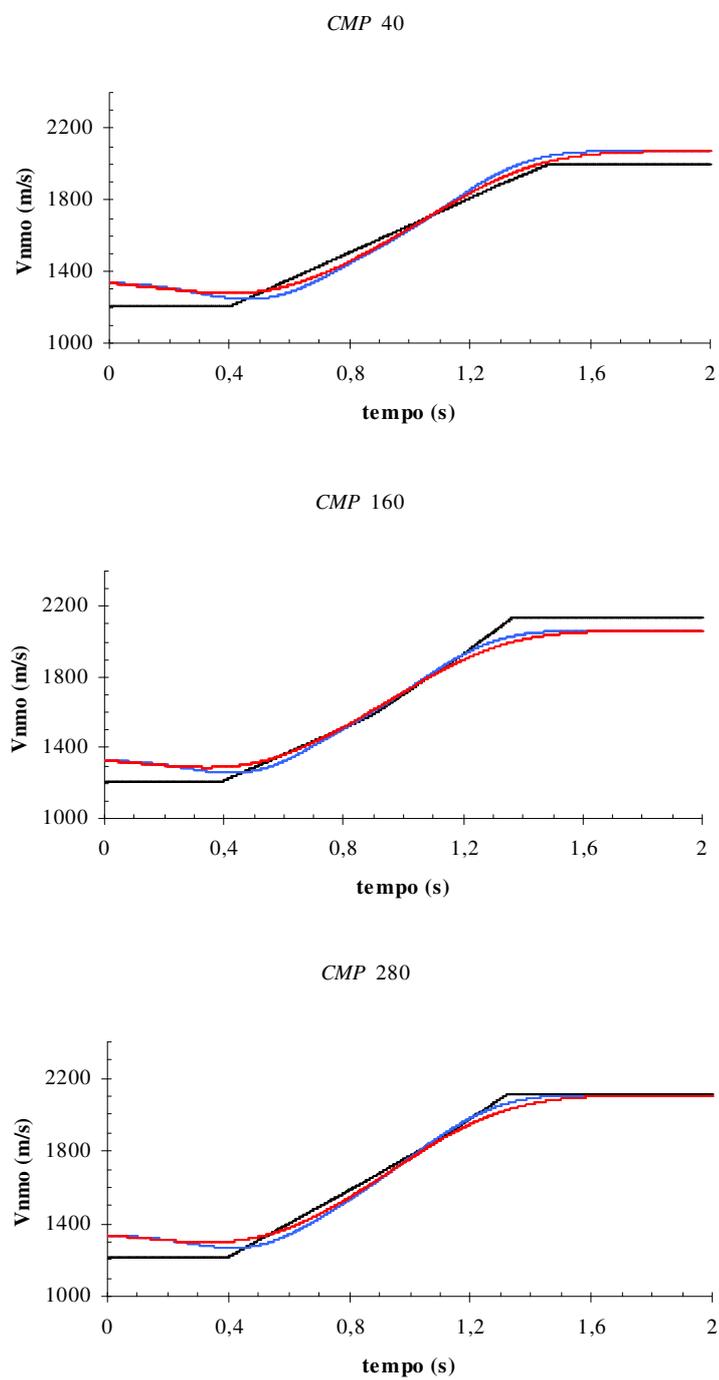


Figura 4.8. Curvas de velocidades do dado sintético para os *CMPs* 40, 160 e 280. Métodos *CMP* (em preto), *CRS* suavizado o dobro de vezes (em vermelho) em relação à curva em azul.

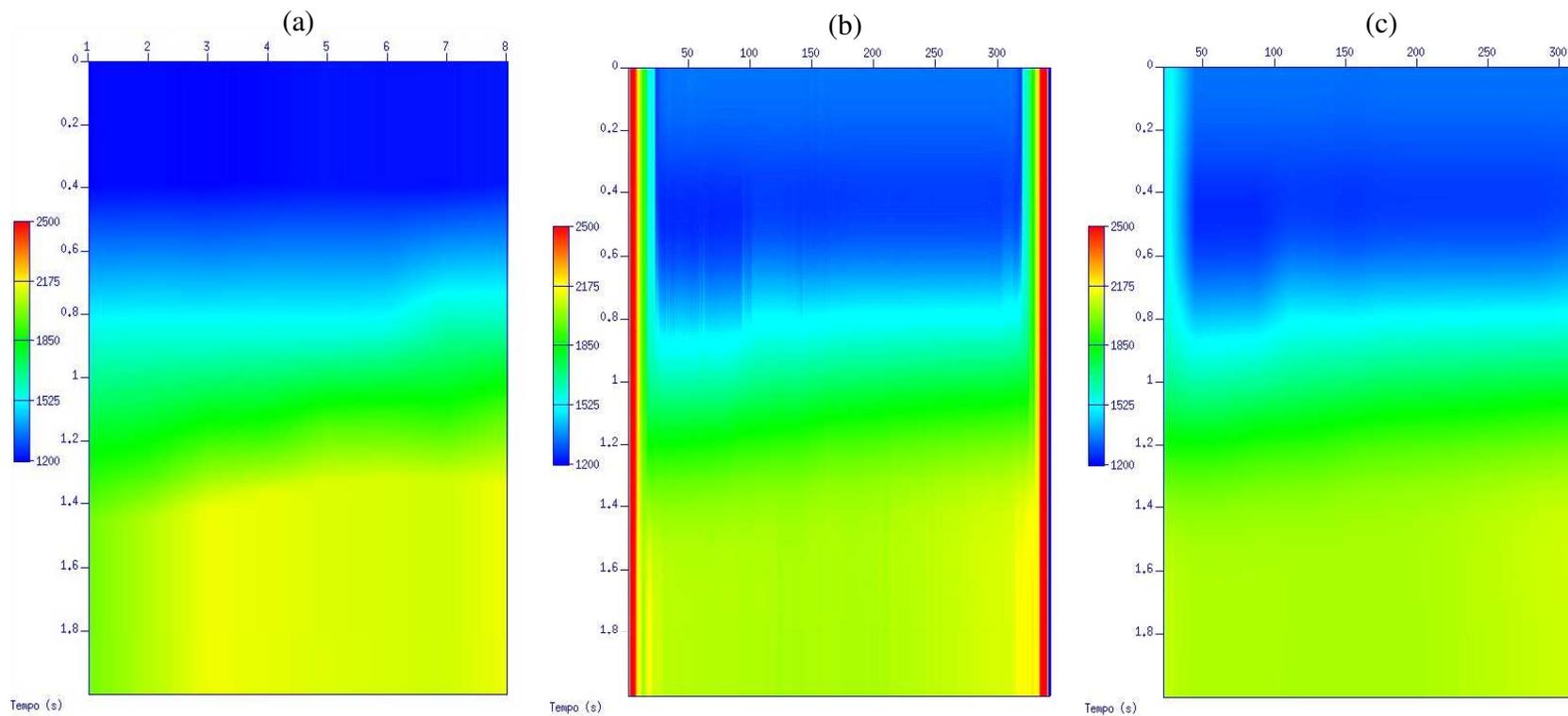


Figura 4.9. Modelos de velocidades (m/s) do dado sintético: (a) método *CMP*, (b) dado suavizado e (c) dado apresentado em (b) com suavização na direção de ζ .

Após obter o modelo de velocidades suavizado pelo filtro descrito na Equação (4.1), efetuamos uma suavização na direção de ζ , ou seja, definimos um intervalo amostral $[\xi_j - m\Delta \zeta, \xi_j + m\Delta \zeta]$, com $m \geq 1$, e computamos a média simples. O mapa de velocidades suavizado em ζ está exibido na Figura 4.9c, o qual pode ser comparado com os mapas de velocidades do dado suavizado apenas no domínio do tempo (Figura 4.9b) e o dado proveniente do método *CMP*. Suas respectivas curvas de velocidades, apenas para o *CMP* 40, estão ilustradas na Figura 4.10.

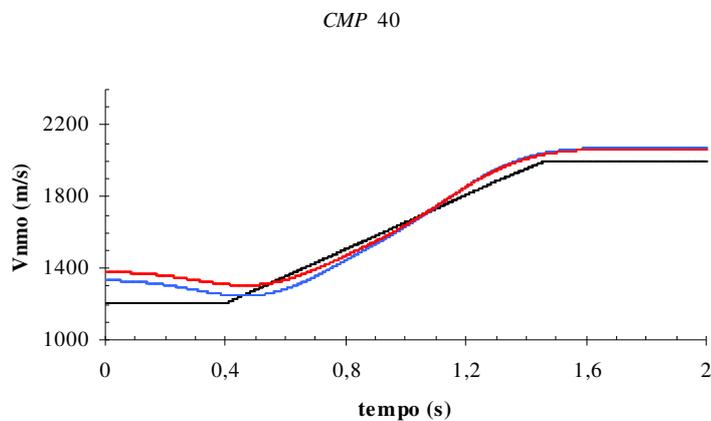


Figura 4.10. Curvas de velocidades (m/s) do dado sintético para os *CMP* 40. Método *CMP* (em preto), dado suavizado (em azul) e dado suavizado na direção de ζ (em vermelho).

4.3. Aplicação da metodologia em dados reais

Os mesmos procedimentos descritos anteriormente, de processamento e obtenção de mapa de velocidades pelas tecnologias *CMP* e *CRS*, foram aplicados para dois dados sísmicos reais de aquisição terrestre, denominados R01 e R02.

A seção de coerência do dado real R01 está exibida na Figura 4.11, a qual apresenta valores muito baixos, não ultrapassando a 0,4, predominando, em sua maioria, valores na ordem de 0,2.

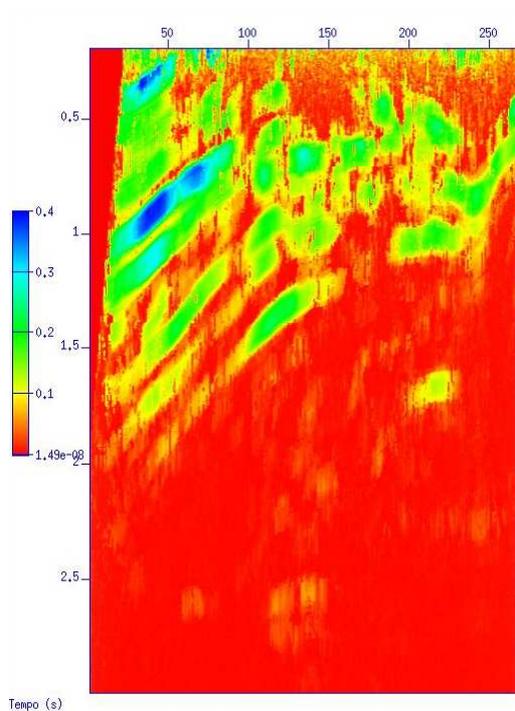


Figura 4.11. Seção de coerência *CRS* do dado real R01.

As seções *ZO* simuladas pelos métodos *CMP* e *CRS* do dado denominado R01 estão apresentadas na Figura 4.12, na parte superior e inferior, respectivamente. Como visto nas Figuras 3.11 (b) e (c) e 4.12, o empilhamento sísmico com máximo aproveitamento de dados multicobertura (método *CRS*) produz seções mais limpas e com maior razão sinal/ruído.

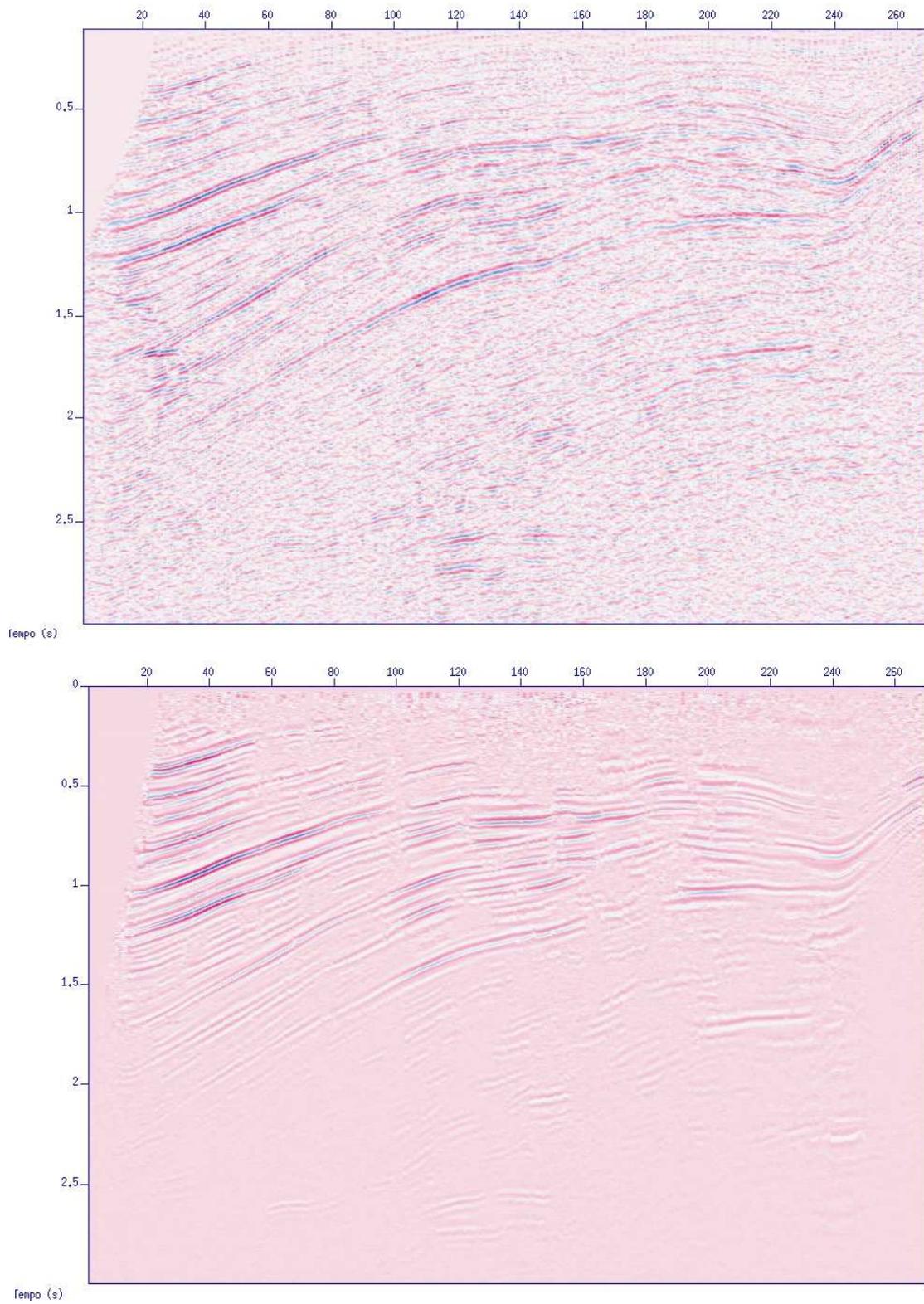


Figura 4.12. Seções simuladas ZO de R01: método *CMP* (acima) e método *CRS* (abaixo).

Aplicando o fluxograma da Figura 4.1 sobre as seções dos parâmetros β e R_{NIP} do dado R01 (vistas, respectivamente, nas Figuras 4.13 (a) e (b)) obtemos o modelo de velocidades de R01 pelo método *CRS*, o qual está apresentado na Figura 4.13c.

Executando o processo para suavizar os dados de V_{NMO} (ver fluxograma da Figura 4.4) no modelo de velocidades da Figura 4.13c, obtemos um mapa de velocidades totalmente incerto (Figura 4.14c). Os valores de amplitudes do modelo de velocidades interpolado são constantes a partir das amostras temporais que apresentam baixos valores de coerência (Figura 4.11), uma vez que o algoritmo trabalha sob condições de coerência.

Para analisar qualitativamente os modelos de velocidades do método *CRS* bruto, interpolado e o suavizado (respectivamente apresentados nas Figuras 4.14 (b), (c) e (d)) e o modelo de velocidade do método *CMP* (Figura 4.14a), selecionamos nos modelos referidos, três traços sísmicos referentes aos *CMPs* 60, 110 e 210 e, neste caso, apresentamos as curvas de velocidades para as quatro condições: *CRS* bruto (em verde), *CRS* interpolado (em azul), *CRS* suavizado (em vermelho) e *CMP* (em preto) na Figura 4.15. Como verificado no caso de dados sintéticos, as curvas de velocidade do método *CRS* sempre se iniciam com valor superior ao método *CMP*.

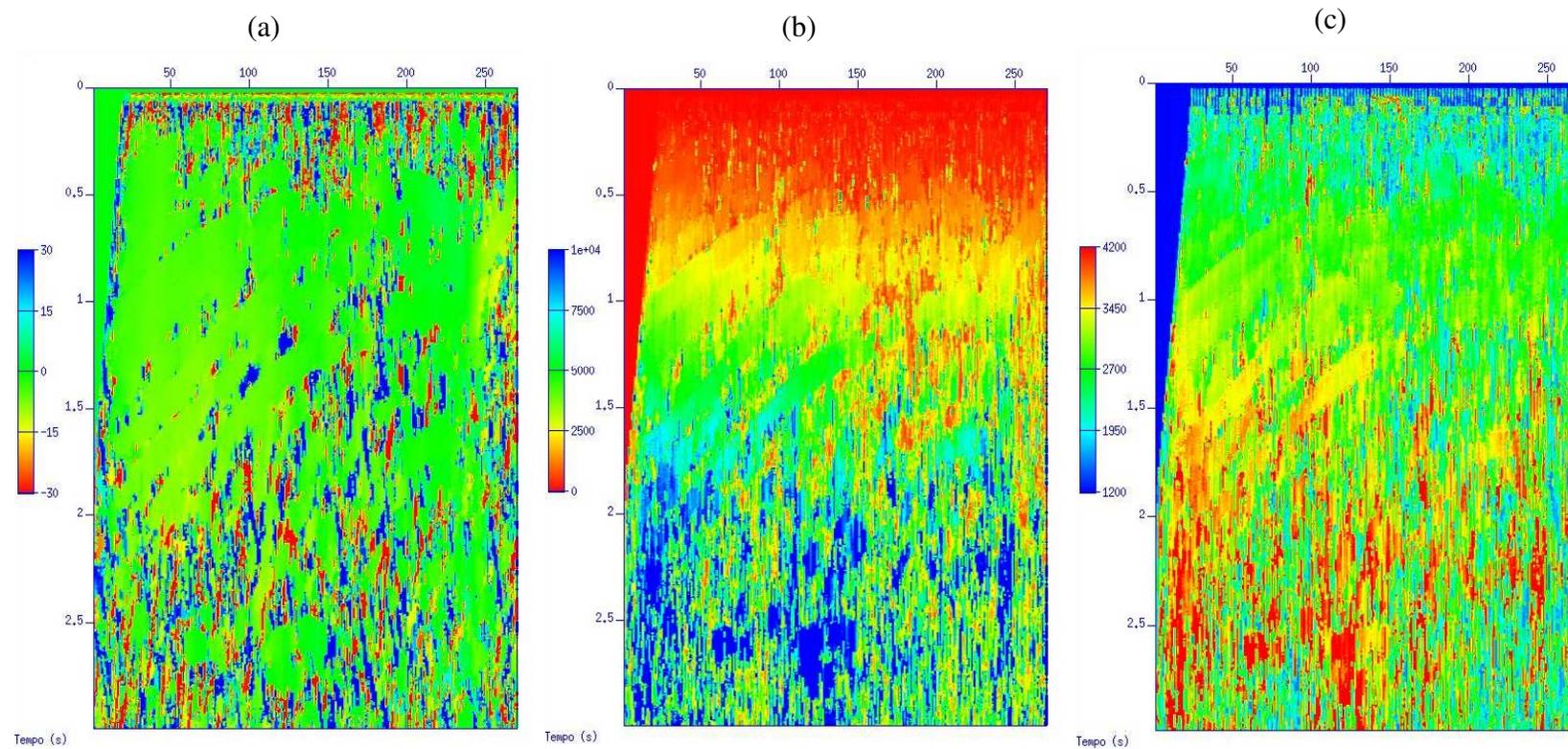


Figura 4.13. Seções CRS de R01: (a) parâmetro β , (b) parâmetro R_{NIP} e (c) V_{NMO} .

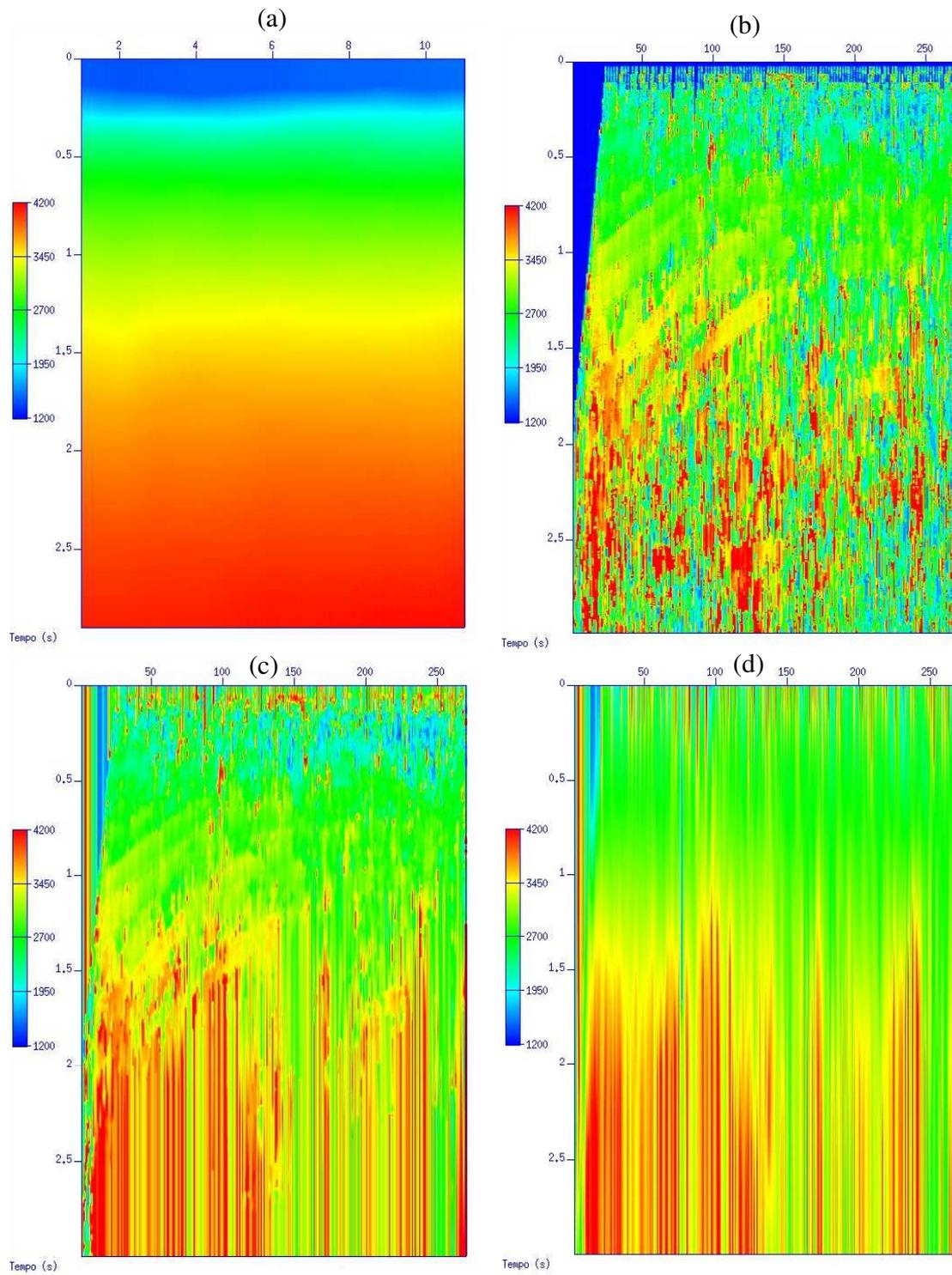


Figura 4.14. Modelos de velocidades (m/s) do dado real R01: (a) *CMP*, (b) *CRS* bruto, (c) *CRS* interpolado e (d) *CRS* suavizado.

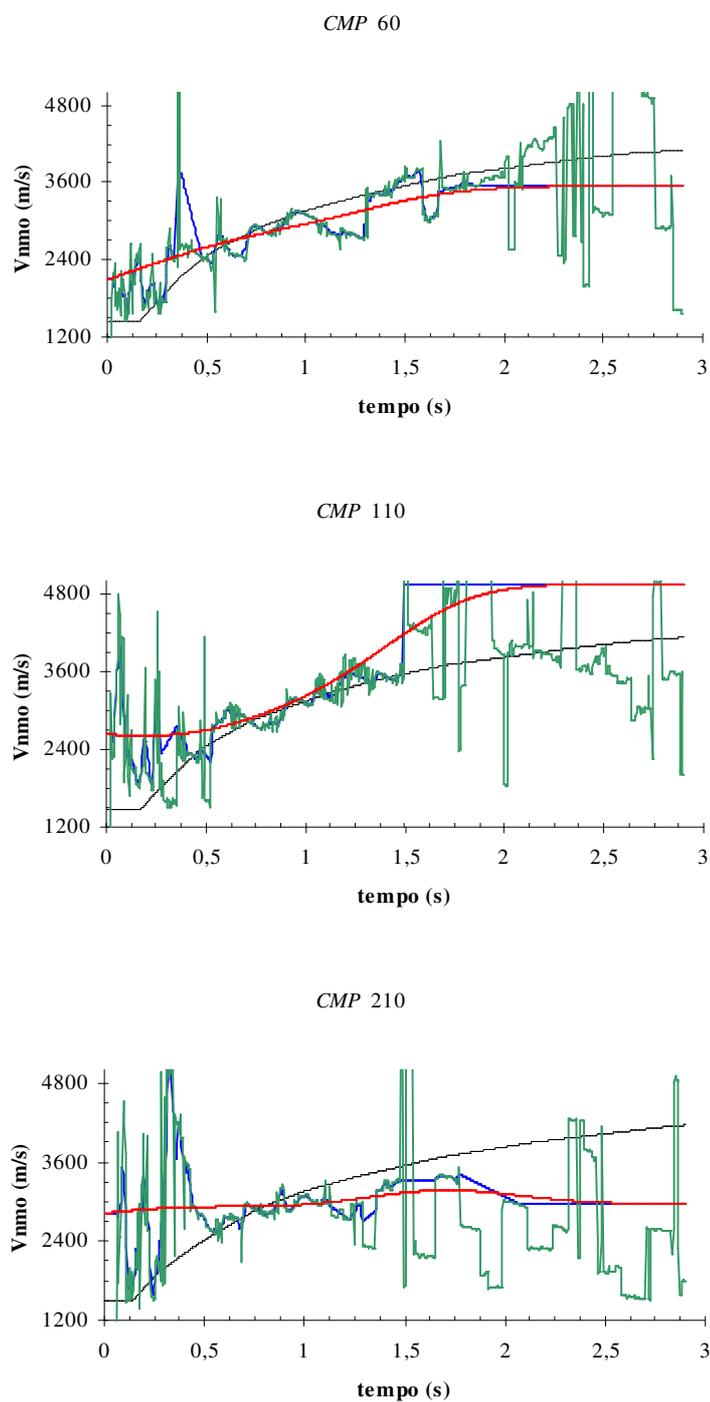


Figura 4.15. Curvas de velocidades (m/s) de R01 para os CMPs 60, 110 e 210. Métodos *CMP* (em preto), *CRS* bruto (em verde), *CRS* interpolado (em azul) e *CRS* suavizado (em vermelho).

Analisando os dados sísmicos reais R02, certificamos que, idêntico ao caso do dado real R01, a seção de coerência apresenta-se com valores baixos, inferiores a 0,4 (Figura 4.16).

As seções *ZO* simuladas pelos métodos *CMP* e *CRS*, respectivamente, parte superior e inferior da Figura 4.17, confirmam que o processamento através do método *CRS* melhora a definição e continuidade dos eventos, quando comparados com os dados sísmicos processados pelo método *CMP*. Estas seções estão apresentadas com o tempo de registro de 2,5s, sendo que o tempo original de registro é de 4s. A decisão de limitar as seções em 2.5s foi apenas para evidenciar os eventos superficiais, os quais se apresentaram mais diferenciados entre as seções *CMP* e *CRS*.

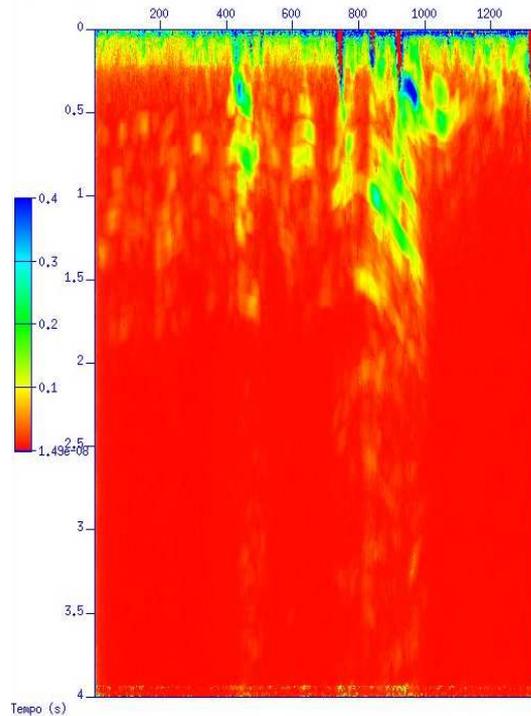


Figura 4.16. Seção de coerência do dado real R02.

Utilizando as seções dos parâmetros β e R_{NIP} do dado R02 (Figuras 4.18 (a) (b)), conforme descrito no fluxograma da Figura 4.1, notamos que o modelo de velocidades de R02 obtido pelo método *CRS* (Figura 4.18c), se apresenta com amplitudes mais uniformes em relação ao dado sísmico real R01.

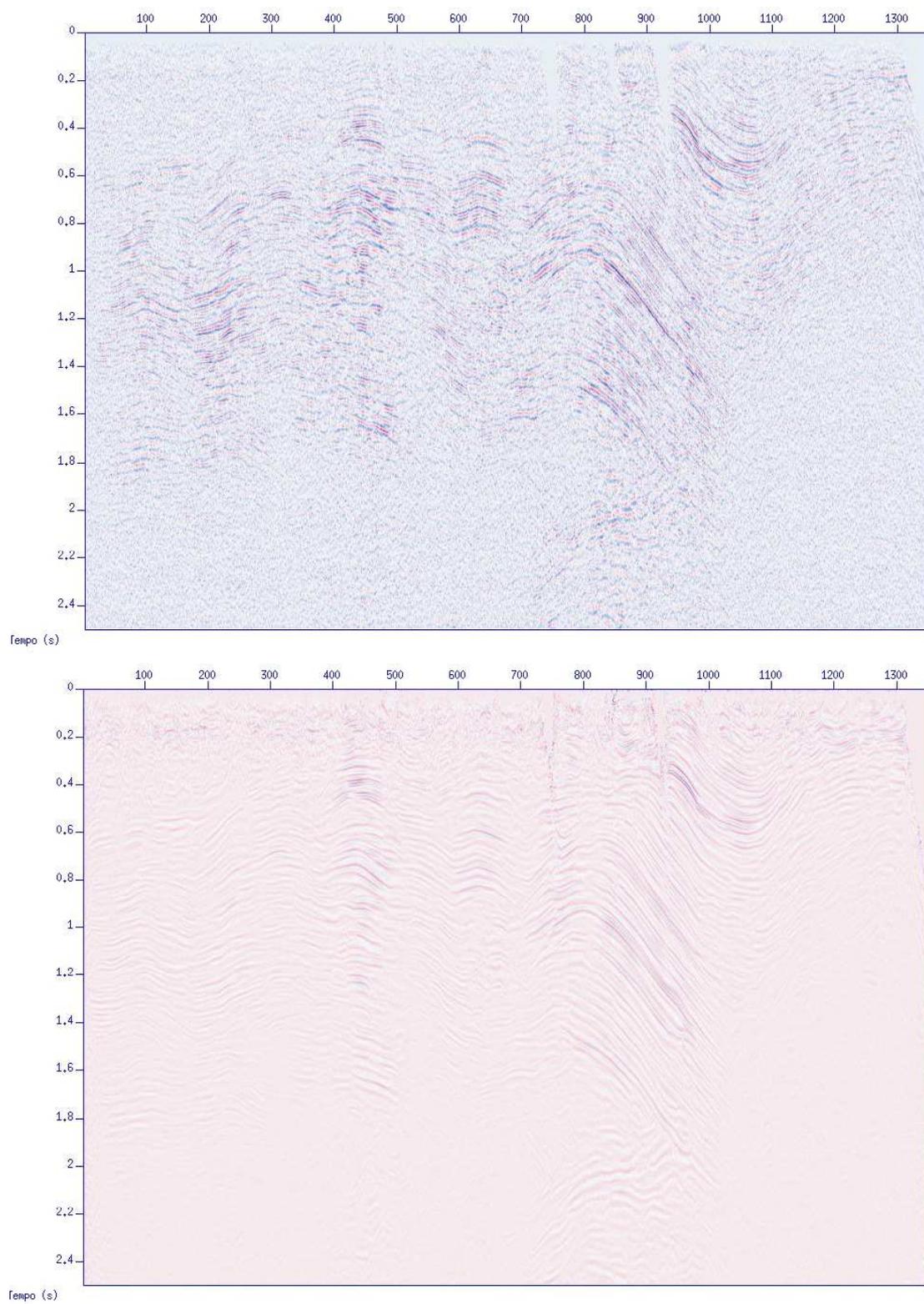


Figura 4.17. Seções simuladas ZO de R02: método *CMP* (acima) e método *CRS* (abaixo).

Os resultados de suavização dos valores de V_{NMO} do dado R02 (Figura 4.18c) são semelhantes aos obtidos do caso de R01, pois através do processo descrito no fluxograma da Figura 4.4, obtemos um mapa de velocidades totalmente distinto (Figura 4.19c), onde as amplitudes do modelo de velocidades interpolado são constantes para todas as amostras cujo valor de coerência é baixo. Os modelos de velocidades exibidos nas Figuras 4.19 (c) e (d) estão com escalas distintas das Figuras 4.9 (a) e (b), respectivamente, dos modelos de velocidades dos métodos *CMP* e *CRS* (bruto), pois queremos avaliar a distribuição espacial de amplitudes, e não a atenuação no modelo do método *CRS*.

Os traços sísmicos referentes aos *CMPs* 200, 800 e 1100 dos modelos de velocidades apresentados na Figura 4.19 foram selecionados para analisar qualitativamente os modelos. Apresentamos na Figura 4.20 para os *CMPs* 200 e 800 e 1100, as curvas de velocidades para as quatro condições: *CMP* (em preto), *CRS* bruto (em verde), *CRS* interpolado (em azul) e *CRS* suavizado (em vermelho).

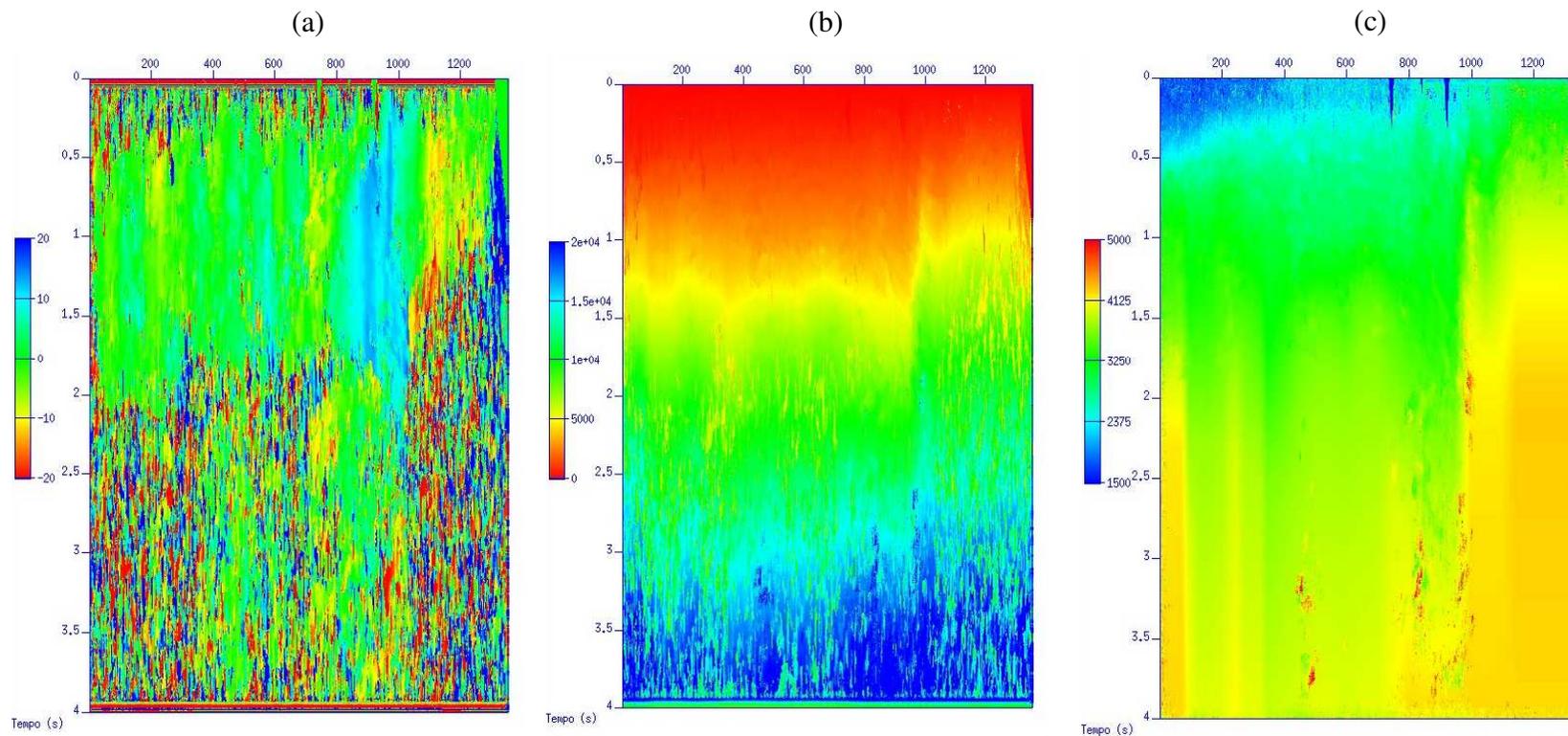


Figura 4.18. Seções *CRS* do dado R02: (a) parâmetro β , (b) parâmetro R_{NIP} e (c) V_{NMO} .

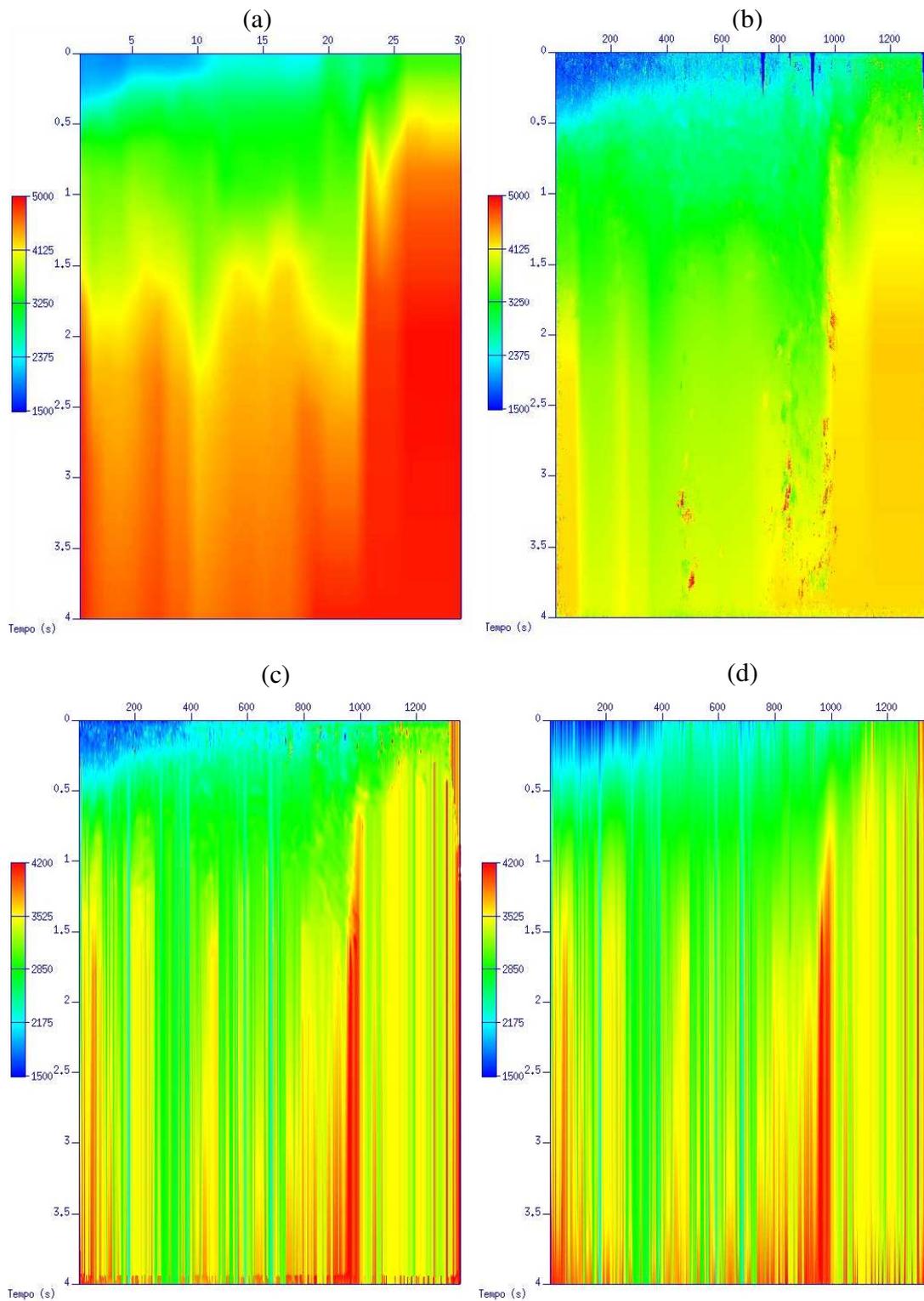


Figura 4.19. Modelos de Velocidades (m/s) de R02: (a) *CMP*, (b) *CRS* bruto, (c) *CRS* interpolado e (d) *CRS* suavizado. Note que (c) e (d) estão em escala distinta em relação à (a) e (b), para melhor visualizar suas anomalias.

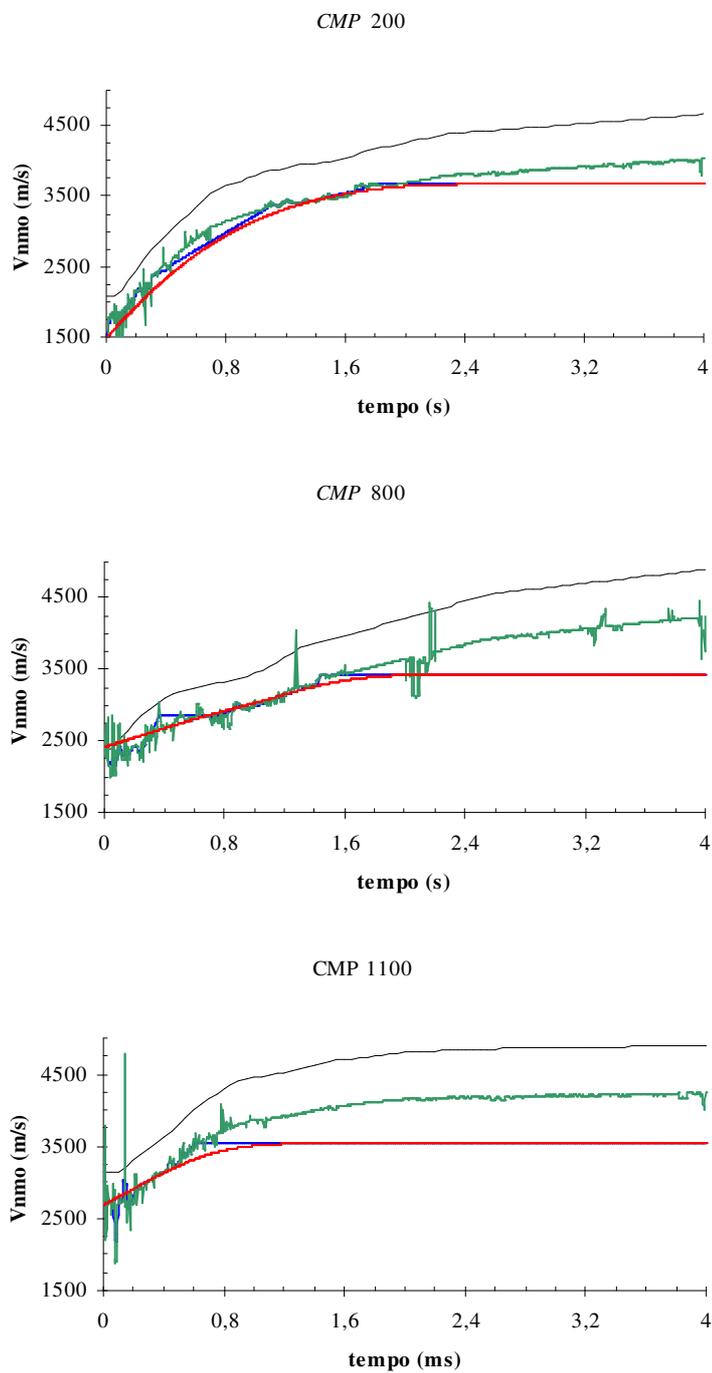


Figura 4.20. Curvas de velocidades (m/s) para os *CMPs* 200, 800 e 1100. Métodos *CMP* (em preto), *CRS* bruto (em verde), *CRS* interpolado (em azul) e *CRS* suavizado (em vermelho).

Capítulo 5

Conclusões

No empilhamento sísmico é necessário o conhecimento de estimativas para a função tempo de trânsito. Habitualmente a correção *NMO* e empilhamento horizontal são utilizados para tal finalidade. Contudo, estas aproximações são função apenas de um parâmetro (velocidade do meio) e consideram a organização em famílias *CMP*. O método *CRS* tem a característica de utilizar uma equação de tempo de trânsito mais geral, podendo empilhar dados de pares fonte-receptor que pertençam a um maior domínio. Neste trabalho, discutimos um algoritmo para se obter, através do método *CRS*, o modelo de velocidades, muito útil para uma variedade de outras tarefas de processamento, imageamento e inversão de dados sísmicos, contribuindo para o crescente uso desta tecnologia.

A análise de velocidades é uma etapa crítica no processamento sísmico e de vital importância para a etapa do empilhamento *CMP*, o que requer alta intervenção de um intérprete por fazer alterações até se obter um bom resultado. No empilhamento *CRS* necessitamos apenas do conhecimento da velocidade superficial e, para casos 2D, o número de parâmetros extraídos são três: β , R_{NIP} e R_N , o que contrasta com o único parâmetro do empilhamento *CMP*.

Ficou claro que o empilhamento sísmico com máximo aproveitamento de dados multicobertura (método *CRS*) produz seções mais limpas e com maior razão sinal/ruído (Figuras 3.11, 4.12 e 4.17).

A V_{NMO} é facilmente adquirida através dos parâmetros β e R_{NIP} e do conhecimento da velocidade na superfície. Porém, como visto nos exemplos computados, o modelo de velocidades resultante do método *CRS* é muito grosseiro, sendo necessário o emprego de algum processo de suavização.

De certa forma é incompatível a comparação dos modelos de velocidades *CMP* e *CRS*, pois não é de pleno conhecimento a metodologia aplicada por *softwares* de processamento sísmico em relação à interpolação das famílias *CMPs*.

Nesta dissertação, apresentamos algumas maneiras de se suavizar as amplitudes de velocidades *CRS*. Conforme visto no Capítulo 4, o intérprete necessita obter uma porcentagem (α_1) para a qual, apenas as amostras cujo o valor de coerência for acima deste valor, será computadas as velocidades. Esse valor de α_1 varia de acordo com o dado sísmico, conforme verificado nos experimentos reais e sintético.

Como visto na seção de coerência do dado sintético (Figura 3.11a), predomina em sua grande maioria, valores de coerência inferiores a 1 apenas nos limites de borda dos eventos e, ao aumentarmos o valor de corte inferior, corte superior e o número de amostras obtemos melhor definição dos eventos, sem a interferência nas bordas (visto em Figuras 4.3 (b) e (c)).

Analisando os valores do mapa de velocidades do dado sintético sem suavização (Figura 4.5b), é possível correlacioná-los com os valores de velocidade do método *CMP* da Figura 4.5a, verificando, grosseiramente, uma tendência de igualdade nos locais de alta coerência.

O processo de interpolação se mostrou muito eficaz, pois ao analisar as curvas de velocidades (Figura 4.6) verificamos a mudança brusca entre as curvas do dado *bruto* e *interpolado*. Ao dobrarmos o número de iterações do filtro baseado na regra de Simpson, notamos que houve um aumento na diferença entre os valores do dado *interpolado* e *suavizado* (Figuras 4.7 e 4.8), porém, não a ponto de alterar significativamente o modelo de velocidades. A tentativa de suavizar utilizando intervalo na direção de ζ também não produziu resultados significativos (Figuras 4.9 e 4.10).

Analisando os dados reais R01 e R02, podemos verificar que o processo de interpolação não gerou bons resultados, uma vez que o algoritmo se baseia nos valores de coerência. Como os valores de coerência de ambos os dados são muito baixos, o algoritmo computou as velocidades apenas no início do registro, atribuindo valor constante de velocidade as amostras de baixa coerência. Assim, a aplicação da metodologia de suavização também ficou comprometida.

Como é comum na geofísica, todo experimento é baseado em modelos simples, considerando camadas homogêneas separadas por interfaces planas ou com mergulho. Os resultados referentes a estas condições foram satisfatórios e, para os dados reais, embora tenham sido animadores, propomos outros experimentos capazes de se obter melhores resultados.

O modelo bruto de V_{NMO} obtido pelo método *CRS* do dado real R02 (Figura 4.19b), é muito semelhante ao modelo proveniente do método *CMP* (Figura 4.19a). Esse fato é atribuído à seção do parâmetro R_{NIP} , a qual está muito bem definida. Desta forma, uma possibilidade seria suavizar as seções dos parâmetros *CRS* β e R_{NIP} na tentativa de se obter um modelo suave de velocidades. Outra possível metodologia seria realizar uma interpolação na direção de ξ respeitando um intervalo de amostras, como realizado nas amostras temporais.

Referências Bibliográficas

- Al-Chalabi, M., 1974, An analysis of stacking, rms, average, and interval velocities over a horizontally layered ground: *Geoph. Prosp.*, 22, 458-475.
- Birgin, E. G., Biloti, R., Tygel, M., e Santos, L. T., 1999, Restricted optimization: a clue to a fast and accurate implementation of the Common Reflection Surface stack method: *Journal of Applied Geophysics*, 42, no. 3-4, 143-155.
- Dix, C. H., 1955, Seismic velocities from surface measurements: *Geophysics*, 20, 68-86.
- Duarte, O. O., 1997, Dicionário enciclopédico inglês-português de geofísica e geologia: PETROBRAS / SBGf.
- Garabito, G., 2001, Empilhamento de superfícies de reflexão comum: Uma nova seqüência de processamento usando otimização global e local: Tese de Doutorado, Universidade Federal do Pará, Brasil.
- Hubral, P., 1983, Computing true amplitude reflections in a laterally inhomogeneous earth. *Geophysics*, 48, no. 8, 1051-1062.
- Hubral, P., 1999, Macro-model independent seismic reflection imaging: *J. Appl. Geophysics*, 42, no. 3, 4.
- Müller, T., 1999, The Common Reflection Surface Stack method – seismic imaging without explicit knowledge of the velocity model: Ph.D. thesis, Geophysical Institute, University of Karlsruhe, Germany.
- Perroud, H., e Tygel, M., 2003, Velocity estimation by the *CRS* method: A *GPR* real data example: 8th. International Congress of Brazilian Geophysical Society.

Taner, M. T., e Koehler, F., 1969, Velocity spectra - digital computer derivation and applications of velocity functions: *Geophysics*, 34, no. 6, 859–881.