



**SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
FACULDADE DE GEOFÍSICA  
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**FABIANO RICINI PINTO**

**ESTIMATIVA AUTOMÁTICA DE PARÂMETROS DE  
EMPILHAMENTO: APLICAÇÃO AO MÉTODO CRS.**

**BELÉM-PA  
2010**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
FACULDADE DE GEOFÍSICA**

**FABIANO RICINI PINTO**

**ESTIMATIVA AUTOMÁTICA DE PARÂMETROS DE  
EMPILHAMENTO: APLICAÇÃO AO MÉTODO CRS.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Geofísica do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará, em cumprimento às exigências para a obtenção de grau de bacharel em Geofísica.

Orientador: Prof. Dr. Jessé Carvalho Costa.

**BELEM-PA  
2010**

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)

Biblioteca Geólogo Raimundo Montenegro Garcia de Montalvão

---

P659e Pinto, Fabiano Ricini

Estimativa automática de parâmetros de empilhamento: aplicação ao método CRS / Fabiano Ricini Pinto; Orientador: Jessé Carvalho Costa – 2010

61 f. : il.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geofísica) – Faculdade de Geofísica, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, Quarto Período de 2010.

1. Geofísica. 2. Empilhamento CMP. 3. Empilhamento CRS. 4. Otimização Powell. 5. Otimização Quase-Newton. 6. Marmosoft. I. Costa, Jessé Carvalho, *orient.* II. Universidade Federal do Pará. III. Título.

CDD 20<sup>o</sup> ed.: 551

---

**FABIANO RICINI PINTO**

**ESTIMATIVA AUTOMÁTICA DE PARÂMETROS DE EMPILHAMENTO:  
APLICAÇÃO AO MÉTODO CRS.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Geofísica do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará, em cumprimento às exigências para a obtenção de grau de bacharel em Geofísica.

Defendido e aprovado em: 16 / 12 / 2010

Conceito: Excelente

Banca examinadora:

---

Prof. Jessé Carvalho Costa - Orientador  
Doutor em Geofísica  
Universidade Federal do Pará

---

Profa. Ellen de Nazaré S. Gomez  
Doutora em Geofísica  
Universidade Federal do Pará

---

Prof. Cícero Roberto T. Régis  
Doutor em Geofísica  
Universidade Federal do Pará

*Aos meus grandiosos pais...*

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, à Deus, por me guiar nesta árdua batalha da vida, e me permitir gozar de mais uma grande vitória .

Aos meus queridos pais, que por toda minha jornada de vida têm me ensinado seus mais preciosos valores morais.

Ao Prof. Dr. Jessé Carvalho Costa pelas orientações, disposição, oportunidade de estágio e pela confiança, em mim depositada.

À Profa. Ellen Gomez e ao Prof. Cícero Regís, pela suas valorosas sugestões.

Aos Professores German Garabito, João Carlos e Pedro Chira por todos os ensinamentos e experiências compartilhadas, estas que contribuíram expressivamente para meu amadurecimento científico.

À Universidade Federal do Pará, pelo espaço e equipamentos cedidos durante minha formação acadêmica.

À FADESP pelo fomento em um determinado período da graduação.

À minha família que sempre me apoiou, em especial, ao meu primo Pedro Reis, que foi o primeiro incentivador no ingresso ao curso de Geofísica.

Ao Roberto Almeida, por todo auxílio concedido na utilização do Laboratório de Processamento Sísmico PROSIS/UFGA.

Às Secretárias Ana Ribeiro e Benildes Souza, por todo suporte administrativo prestado nestes anos de curso.

Aos amigos que a geofísica me apresentou, Adriano Ferreira, Caio Peixoto, Ciro Clímaco, Danilo Ferreira, Fábio Rolim, Fernando Sales, Herbert Neves, Isabela Lima, Itamara Campos, Kauê Paraense, Manoel Leão, Ordilei Pantoja, Raphael di Carlo e Rafael Furtado.

Aos companheiros de Laboratório Glauco Lira e Manoel Costa.

Ao amigo Valdson Amorin e seu incansável auxílio.

Aos conselhos do amigo Carlos França e da família Moreira.

A todas aquelas pessoas que de forma direta ou indireta tiveram participação neste trabalho, e que minha falha mente persiste em não lembrar.

“A persistência é o caminho do êxito.”  
Charles Chaplin.

## RESUMO

Empilhamento sísmico tem o objetivo de simular um experimento de afastamento nulo e é frequentemente aplicado no processamento de dados sísmicos com múltipla cobertura. A seção empilhada apresenta maior relação sinal-ruído que os dados sísmicos. Em sua forma convencional, o empilhamento sísmico está associado à reorganização dos traços em famílias CMP, à etapa de análise de velocidade, e às aplicações das correções NMO e DMO. Alternativamente, as seções de afastamento nulo podem ser obtidas através da estimativa automática de parâmetros que otimizam medidas de coerência em um conjunto de CMPs adjacentes. Na literatura, existem várias metodologias para se realizar a otimização desses parâmetros, neste Trabalho de Conclusão de Curso realizei a implementação das técnicas de otimização Powell e Quase-Newton. Estes algoritmos foram validados para o método CRS 2D no conjunto de dados sintéticos *Marmousoft*. Os experimentos numéricos indicam que os dois métodos são eficientes e que o método de Powell apresentou melhor eficácia na estimativa dos parâmetros.

**Palavras chave:** Geofísica. Empilhamento CMP. Empilhamento CRS. Otimização Powell. Otimização Quase-Newton. Marmousoft.

## ABSTRACT

Seismic stacking has the goal of simulate a zero offset experiment, and it is widely applied in the seismic data processing to multiple coverage. The stacked section has a better signal to noise ratio than the seismic data. In the conventional form, the seismic stacking is associated with CMP sort data, the velocity analysis, and the application of NMO and DMO correction. In other hand, simulate of zero offset section can be achieved throw automatic parameter estimation that select coherence measures in a CMP neighbor. On literature, there are many methodologies to accomplish the optimization parameters, in this Final Course Report (TCC), I implemented the Powell and Quasi-Newton optimization technique. These algorithms were tested to the CRS 2D method in a set of synthetic Marmousoft data. Numerical experiments indicate that both method are efficient, moreover, Powell method is more accurate to estimate parameters.

**Key words:** Geophysics. CMP stacking. CRS stacking. Powell optimization. Quase-Newton optimization. Marmosoft.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 2.1: Em A o registro de campo organizado em família CMP, B o dado normalizado, e finalmente em C, o dado empilhado.
- Figura 2.2: Representação esquemática de um meio homogêneo com um refletor inclinado.
- Figura 2.3: Em a, 5 famílias CMP, diferenciadas pela cor dos raios, iluminando um segmento do refletor curvo. Em b, é aplicado um *zoom* na imagem a para ressaltar como um segmento do refletor é parcialmente reiluminado por outras famílias CMP (buscar a interseção entre os traços coloridos). Fonte: Hertweck et.al.(2007).
- Figura 2.4: Parâmetros CRS para um raio central de incidência normal  $X_0NIPX_0$ : o ângulo de emergência  $\alpha$  e as frentes de ondas NIP e N.  $\Sigma$  é o refletor, a coordenada do ponto central é  $X_0$ , e S e G são as posições da fonte e do receptor para uma reflexão paraxial em R.
- Figura 2.5: Uma representação esquemática do princípio de foco no método de empilhamento multifocus.
- Figura 2.6: Uma representação esquemática da formação da frente de onda CEE.
- Figura 2.7: Uma representação esquemática da formação da frente de onda CRE.
- Figura 3.1: Função genérica que visa estabelecer um conceito intuitivo de uma função multimodal, salientando com as setas em azuis os mínimos locais e em vermelho o mínimo global.
- Figura 4.1: Perfil geológico da bacia de Cuanza, Angola, utilizado para construção do modelo Marmousi.
- Figura 4.2: Modelo de velocidades dos dados sísmicos Marmousi.
- Figura 4.3: Modelo de velocidades do dado sintético Marmousoft.
- Figura 2.4: Seção de menor afastamento do dado Marmousoft (100 m).
- Figura 4.5: Seção CRS do ângulo de emergência (método de otimização Powell).
- Figura 4.6: Seção CRS do raio de curvatura da onda NIP (método de otimização Powell).
- Figura 4.7: Seção CRS do raio de curvatura da onda N (método de otimização Powell).

- Figura 4.8: Seção coerência do CRS (método de otimização Powell).
- Figura 4.9: Seção CRS empilhada (método de otimização Powell).
- Figura 4.10: Seção CRS do ângulo de emergência (método de otimização Quase-Newton).
- Figura 4.11: Seção CRS do raio de curvatura da onda NIP (método de otimização Quase-Newton).
- Figura 4.12: Seção CRS do raio de curvatura da onda N (método de otimização Quase-Newton).
- Figura 4.13: Seção coerência do CRS (método de otimização Quase-Newton).
- Figura 4.14: Seção CRS empilhada (método de otimização Quase-Newton).
- Figura 4.15: Falhas, indicadas por setas negras, na seção do ângulo de emergência (método de otimização Quase-Newton).
- Figura 4.16: Falhas, indicadas por setas negras, na seção do raio de curvatura da onda NIP (método de otimização Quase-Newton).
- Figura 4.17: Falhas, indicadas por setas negras, na seção do raio de curvatura da onda N (método de otimização Quase-Newton).
- Figura 4.18: Falhas, indicadas por setas negras, na seção de coerência (método de otimização Quase-Newton).
- Figura 4.19: Seções empilhadas pelo método CRS. A superior, obtida pela otimização Powell, enquanto a inferior, gerada com a otimização Quase-Newton.

## LISTA DE SÍMBOLOS

CMP	Ponto Médio Comum
NMO	Sobretempo Normal
DMO	Sobretempo de Mergulho
CRS	Superfície de Reflexão Comum
NIP	Ponto de incidência normal
MF	Multifocus
$CEE$	Elemento evoluta comum
$CRE$	Elemento de reflexão comum
$n$	$n$ -ésima camada plana horizontal
$v_n$	Velocidade intervalar indexada pelo número de camadas
$v_{emp}$	Velocidade de empilhamento
$v_{rms}$	Velocidade média quadrática
$v_0$	Velocidade próxima a superfície
$v_{CMO}$	Velocidade associada à curvatura do refletor
$v_{NMO}$	Velocidade associada à inclinação do refletor
$e_n$	Espessura da camada indexada pelo numero da mesma
$x$	Afastamento entre fonte e receptor
$t$	Tempo de trânsito
$\tau_0$	Tempo duplo da trajetória vertical com afastamento nulo
$h$	Meio afastamento fonte-receptor
$\Phi$	Ângulo de mergulho do refletor
$x_s$	Coordenada da fonte
$x_g$	Coordenada da geofone
$\Delta m$	Coordenada relativa do CMP
$A$	Parâmetro CRS associado ao ângulo de emergência
$B$	Parâmetro CRS associado à $v_{CMO}$
$C$	Parâmetro CRS associado à $v_{NMO}$
$X_0$	Ponto de emergência
$S$	Coerência
$\Sigma$	Somatório

*U* Amplitude do sinal sísmico

*M* Número de traços

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	15
<b>2</b>	<b>EMPILHAMENTO DE DADOS SÍSMICO</b> .....	17
2.1	EMPILHAMENTO CONVENCIONAL .....	17
2.2	EMPILHAMENTO POR SUPERFICIE DE REFLEXÃO COMUM (CRS) .....	20
<b>2.2.1</b>	<b>Operador de empilhamento CRS 2D</b> .....	22
2.3	EMPILHAMENTO MULTIFOCUS (MF) .....	24
<b>2.3.1</b>	<b>A correção do <i>moveout</i> no multifocus (MF)</b> .....	25
<b>3</b>	<b>DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DE EMPILHAMENTO</b> .....	29
3.1	OTIMIZAÇÃO EM SEUS ASPECTOS GERAIS .....	29
3.2	A FUNÇÃO-OBJETO NOS MÉTODOS DE EMPILHAMENTO .....	32
3.3	MÉTODO DE OTIMIZAÇÃO POWELL .....	34
<b>3.3.1</b>	<b>Algoritmo Powell de Direções Conjugadas</b> .....	35
3.4	MÉTODO DE MINIMIZAÇÃO QUASE-NEWTON .....	36
<b>3.4.1</b>	<b>Algoritmo de Minimização Quase-Newton</b> .....	37
<b>4</b>	<b>EXEMPLOS NUMÉRICOS DAS METODOLOGIAS DE OTIMIZAÇÃO</b> .....	39
4.1	O DADO SINTÉTICO 2D MARMOUSI .....	39
4.2	O DADO SINTÉTICO 2D MARMOUSOFT .....	42
4.3	RESULTADOS DO EMPILHAMENTO CRS .....	44
<b>4.3.1</b>	<b>Empilhamento CRS Utilizando a Metodologia de Otimização Powell</b> .....	46
<b>4.3.2</b>	<b>Empilhamento CRS Utilizando a Metodologia de Otimização Quase-Newton</b> .	52
4.4	ANÁLISE DOS RESULTADOS .....	58
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	61
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	62

## 1. INTRODUÇÃO

A atual ligação entre a economia mundial e a produção de petróleo reflete na contínua necessidade de descobertas de acumulações petrolíferas economicamente exploráveis, assim como, no monitoramento das reservas já em exploração visando o melhor aproveitamento destas. Com o objetivo de desenvolver avanços na tecnologia de exploração e monitoramento de reservatórios, a indústria do petróleo investe uma quantidade maciça de subsídios sobre as áreas de conhecimento como as geociências. Dentro destas, a geofísica desempenha papel fundamental, haja vista a relação custo benefício da aplicabilidade dos seus métodos. Através da sísmica é possível imagear a subsuperfície e assim ter como produto uma imagem sísmica (seção sísmica) da zona de interesse, mapeando o arcabouço estrutural e abstraindo parâmetros que venham a caracterizar sua litologia, sem que haja algum tipo de estudo direto da subsuperfície.

A obtenção de uma seção sísmica representativa há muito tempo vem sendo tratada como um grande desafio no âmbito da exploração de petróleo. Desde as premissas do método CMP em (TANER; KOEHLER, 1969), passando pelas aplicações das correções NMO em (HUBRAL; KREY, 1980) e DMO em (DEREGOWSKI; ROCA, 1981) para um tipo de processamento que classificamos como convencional, quanto em vertentes alternativas que sugerem os métodos que independem do macro-modelo de velocidade. São eles: o Polystack, (de BAZELAIRE, 1988; THORE et al., 1994), o empilhamento Common Reflection Surface (CRS) (MULLER, 1999; JAGER, 1999), o empilhamento Multifocos (GELCHINSKY et al., 1997; BERKOVITCH et al., 1998; CHIRA, 2000), que o produto final do processamento sísmico vem recebendo contínuos avanços, promovendo assim um resultado mais significativo, mesmo em casos onde o comportamento geológico é considerado complexo.

Alvo de diversos projetos de pesquisas, tanto na esfera científica quanto comercial, a otimização de parâmetros trata de direcionar as perspectivas de resultados às escolhas dos parâmetros ótimos (mínimo global), que

posteriormente poderão ser usados em curvas de empilhamento, a um baixo custo computacional e também em um reduzido tempo de processamento. Neste sentido, ainda é válida a informação de que embora exista uma tendência para o imageamento *prestack* (tanto em tempo, quanto em profundidade), as seções empilhadas ainda representam a um importante passo dentro do fluxo de processamento, salientando que estas foram as primeiras imagens representativas e interpretáveis da subsuperfície.

No trabalho em tela, será ratificada a eficiência e precisão das estratégias de minimização Powell e Quase-Newton, que serão aplicadas sobre o operador de empilhamento CRS 2D.

## ESTRUTURA DO TRABALHO.

Além deste capítulo introdutório, o corpo deste trabalho é constituído pelos seguinte capítulos:

**Capítulo 2:** Neste capítulo, apresento as idéias e fórmulas fundamentais da teoria do empilhamento sísmico, no que tange à vertente convencional e a alternativa.

**Capítulo 3:** Nesta etapa do trabalho introduzo as técnicas de otimização automática Powell e Quase-Newton. Também exponho os respectivos algoritmos.

**Capítulo 4:** Elenco as peculiaridades referente ao modelos Marmousi e Marmousoft. Além disso, Realizo uma avaliação comparativa da aplicação das metodologias de otimização.

**Capítulo 5:** Concluo o trabalho enfatizando as grandes virtudes destas metodologias de busca automática , aponto a metodologia de resultados mais satisfatórios e realço algumas características referentes ao empilhamento CRS2 D.

## 2. EMPILHAMENTO DE DADOS SÍSMICO

Neste capítulo será realizado um apanhado geral a respeito da teoria do empilhamento sísmico convencional; serão salientadas algumas vertentes alternativas como o método CRS e Multifocus. Consta neste capítulo também, uma abordagem matemática dos operadores de empilhamento mencionados.

### 2.1 EMPILHAMENTO CONVENCIONAL

O empilhamento é uma das três crucias etapas do processamento de dados sísmicos (deconvolução, empilhamento e migração), esta etapa desempenha o importante papel de aumentar a relação sinal-ruído no dado sísmico (YILMAZ, 2000). É interessante introduzir a ideia de que o empilhamento convencional, ou empilhamento CMP, cujo objetivo de sobrepor as amplitudes dos traços de cada família CMP, após a correção NMO, de modo que o resultado final determine um único traço. O traço resultante simula uma aquisição de afastamento nulo, ou *zero offset*, onde a fonte e o receptor estão posicionados coincidentemente (o que é fisicamente impossível), sobre o ponto médio comum (CMP). Observando a Figura 2.1 é possível obter uma ideia mais clara do empilhamento CMP.



Figura 2.1: Em A o registro de campo organizado em família CMP, B o dado normalizado, e finalmente em C, o dado empilhado.

Para que seja realizado o empilhamento CMP, faz-se necessária a correção de sobretempo normal, ou simplesmente correção NMO. A correção NMO é a horizontalização dos dados coletados no levantamento sísmico (vide Figura 2.1, de A para B). Teoricamente, a correção NMO pode ser aplicada sob a hipótese de que o meio apresente mais de uma camada homogênea, sobrepostas e com interfaces planas. Desta forma, se considerarmos um meio composto por  $n$  camadas planas horizontais, com velocidades intervalares  $(v_1, v_2, \dots, v_n)$  e espessuras  $(e_1, e_2, \dots, e_n)$ , segundo Taner e Koehler (1969), o tempo de trânsito para a trajetória do raio que parte da fonte atravessa as  $n$  camadas e por reflexão retorna à superfície, associado com o afastamento  $x$ , é dado pela expressão 2.1

$$t^2(x) = C_0 + C_1x^2 + C_2x^4 + C_4x^6 + \dots \quad 2.1$$

onde os coeficientes  $C_0, C_1, C_2, \dots$  dependem das espessuras e das velocidades das camadas. Além disso, Taner e Koehler (1969) também mostram que a aproximação de segunda ordem da série 2.1 já produz um ajuste hiperbólico do evento de reflexão satisfatório, para dados sísmicos com pequenos afastamentos. Resultando assim na relação matemática 2.2

$$t^2(x) = \tau_0^2 + \frac{x^2}{v_{emp}^2} \quad 2.2$$

sendo  $C_0 = \tau_0^2$  e  $C_1 = 1/v_{emp}^2$ . A velocidade de empilhamento  $v_{emp}$  corresponde nesse caso à velocidade média quadrática (*root mean square*) denotada por  $v_{rms}$ , cuja expressão é dada em 2.3

$$v_{rms}^2 = \frac{1}{\tau_0} \sum_{i=1}^n v_i^2 \Delta t_i(0) \quad 2.3$$

onde  $\Delta t_i$  é o tempo duplo vertical através da  $i$ -ésima camada e  $\tau_0$  o tempo duplo da trajetória vertical com afastamento nulo. Portanto, a correção NMO

em meios horizontalmente estratificados é realizada com base nas expressões 2.2 e 2.3.

Em casos com refletores inclinados a velocidade de empilhamento deve sofrer o efeito do ângulo de inclinação da camada. Haja vista que se deve corrigir a não unicidade na iluminação de um ponto em profundidade. Este problema é corrigido pela aplicação da correção DMO (do inglês, *Dip MoveOut*).

Levin (1971) mostra que a correção DMO, aplicada para a configuração CMP em um meio homogêneo e com um refletor inclinado (figura 2.2), é expressa pela relação do tempo de trânsito da reflexão primária (equação 2.4).

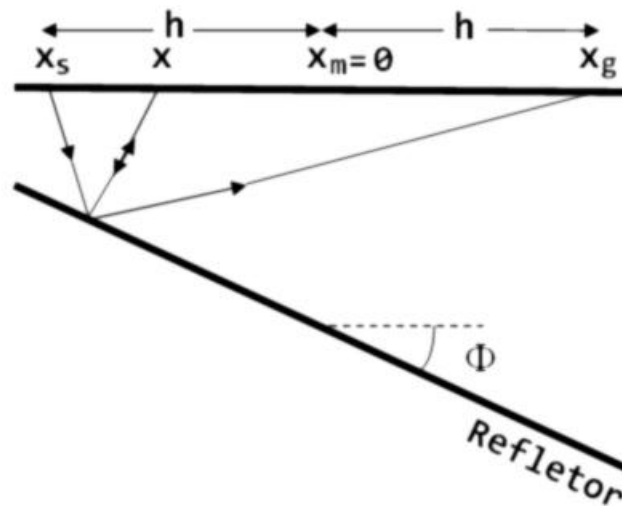


Figura 2.2: Representação esquemática de um meio homogêneo com um refletor inclinado.

$$t^2(h) = \tau_0^2 + \frac{4h^2}{v_{emp}^2} \quad 2.4$$

sendo

$$v_{emp} = \frac{v}{\cos \Phi} \quad 2.5$$

onde  $\tau_0$  é o tempo duplo de afastamento nulo,  $h$  é a metade do afastamento fonte-receptor,  $v$  é a velocidade do meio e  $\alpha$  é a inclinação do refletor. Nota-se

que quando  $\Phi$  tende a zero, a equação retorna à correção NMO (que é a equação 2.2).

O empilhamento convencional pode também atenuar a influência de eventos indesejáveis, por meio de interferência destrutiva. É o caso da supressão das ondas diretas, também classificadas como superficiais, as quais não apresentam curvas de tempo preditas pela correção NMO.

Mesmo com as disparidades entre as considerações ideais para o uso do operador de empilhamento convencional e as reais condições geológicas ao qual o mesmo é submetido, o processo de empilhamento é uma técnica muito bem consolidada. Este processo é extensivamente usado na indústria petrolífera para produzir seções de afastamento nulo com um baixo esforço computacional. Contudo, este processo requer o conhecimento prévio do modelo de velocidades.

Dada algumas limitações do empilhamento convencional, é o caso dos refletores com forte curvatura e também a presença de fortes variações laterais de velocidade, podendo ou não estar os dois fatores associados, surgem diretrizes alternativas de empilhamento sísmico. Sobre estas possíveis vertentes a abordagem deste trabalho continua.

## 2.2 EMPILHAMENTO POR SUPERFICIE DE REFLEXÃO COMUM (CRS)

O empilhamento CRS está fundamentado sobre as mesmas idéias e princípios do empilhamento convencional (CMP). A diferença básica é que o empilhamento CRS utiliza uma quantidade maior de traços sísmicos do que aquela já encontrada numa família CMP. Por esta razão, o CRS costuma gerar seções sísmicas empilhadas com a relação sinal-ruído mais elevadas que a seção sísmica obtida pelo empilhamento CMP.

O ponto de partida do CRS admite a possibilidade de encontrar informações pertinentes à reflexão registrada em um determinado CMP, fora desta família. Essa ideia é viabilizada pela não singularidade pontual de iluminação por um CMP, em um meio com refletor não plano. Desta forma, a família CMP passa a iluminar um pequeno segmento do refletor, que será

parcialmente reiluminado pelas famílias CMPs posteriores, Hertweck et.al.(2007).

Outro fator que merece destaque na metodologia do empilhamento CRS é a não dependência do macro modelo de velocidade. Só o conhecimento da velocidade próxima à superfície terrestre e os parâmetros CRS (que são obtidos por uma busca tri-paramétrica no dado multicobertura) são requeridos para simular a seção de afastamento nulo e gerar as seções dos atributos CRS e de coerência.

Encontrar continuidade no evento de reflexão não só dentro da família CMP, mas também fora dela, demanda um substancial incremento no custo computacional, além de algumas dificuldades para lidar corretamente com situações de mergulhos conflitantes. Sendo importante elencar que em situações de mergulhos conflitantes o operador CRS tende a realizar a supressão de eventos, em outras palavras, ele irá optar por apenas um evento.

A metodologia de empilhamento CRS trata de forma diferenciada as correções NMO e DMO, estas, abordadas como etapas necessárias antes do empilhamento convencional para um refletor de geometria não plana. Na metodologia do CRS tais correções não são realizadas, porque o operador CRS já contém parâmetros que estão vinculados aos efeitos da inclinação do refletor, assim como da curvatura do mesmo.

### 2.2.1 Operador de empilhamento CRS 2D

A expansão hiperbólica de segunda ordem em série de Taylor, que aproxima os tempos de trânsito dos raios na vizinhança de um raio central fixo, é obtida por meio da teoria paraxial do raio (Schleicher et al., 1993). A relação matemática que vem proporcionar o empilhamento CRS dos dados sísmicos multicobertura é denominada de operador CRS, que em sua formatação bidimensional depende de três parâmetros (equação 2.6), e está baseada em um modelo descrito na figura 2.3.

$$t_{CRS}^2(\Delta m, h; \tau_0) = [\tau_0 + A\Delta m]^2 + B\Delta m^2 + Ch^2 \quad 2.6$$

De forma que as equações 2.7, 2.8, e 2.9 completam o operador.

$$A = 2p \quad 2.7$$

$$B = 1/V_{CMO}^2 \quad 2.8$$

$$C = 4/V_{NMO}^2 \quad 2.9$$

Nas relações acima,  $h$  representa o meio afastamento,  $\Delta m$  é a relativa coordenada do CMP,  $p$  é o atributo que está vinculado ao ângulo de emergência medido na superfície, e por fim,  $v_{CMO}$  e  $v_{NMO}$  são as velocidades que estão associadas com a curvatura e inclinação do refletor, respectivamente.

Fundamentado na Figura 2.3, admite-se um refletor curvo  $\Sigma$  em profundidade e um raio fixo com afastamento entre fonte e receptor nulo,  $X_0NIPX_0$ , em que  $NIP$  é o ponto de incidência normal. Para um par formado por fonte e receptor ( $S, G$ ) na região de vizinhança do ponto de emergência  $X_0$  do raio central, obtém-se um raio de reflexão primária  $SRG$  com relação ao mesmo refletor  $\Sigma$ .

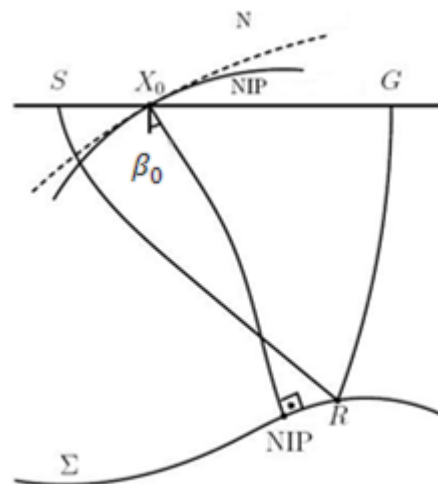


Figura 2.3: Parâmetros CRS para um raio central de incidência normal  $X_0NIPX_0$ : o ângulo de emergência  $\alpha$  e as frentes de ondas NIP e N.  $\Sigma$  é o refletor, a coordenada do ponto central é  $X_0$ , e S e G são as posições da fonte e do receptor para uma reflexão paraxial em R.

É relevante o número de trabalhos publicados em que os três parâmetros, já salientados, são abordados como atributos CRS ( $\beta_0, R_N, R_{NIP}$ ). Tais atributos apresentam apenas uma parametrização diferenciada do mesmo problema, de modo que eles se relacionam da forma expressa nas equações 2.10, 2.11 e 2.12

$$p = \frac{\text{Sen } \beta_0}{v_0} \quad 2.10$$

$$v_{NMO}^2 = \frac{2v_0 R_{NIP}}{t_0 \text{Cos}^2 \beta_0} \quad 2.11$$

$$v_{CMO}^2 = \frac{v_0 R_N}{2t_0} \quad 2.12$$

Nas relações acima, os elementos  $v_0, R_N$  e  $R_{NIP}$  significam: velocidade próxima a superfície, raio de curvatura da onda normal e raio de curvatura da onda NIP, que por sua vez, são parâmetros das ondas hipotéticas que foram utilizadas por Hubral (1983), para definir as trajetórias de empilhamento usadas no método superfície de reflexão comum.

Um ponto muito importante no empilhamento CRS está vinculado à abertura do operador CRS. Segundo Hertweck et.al.(2007), a abertura do operador é feita em dois sentidos. O primeiro, na direção do meio afastamento ( $h$ ), na direção do CMP. E o segundo, na direção fora da família CMP, na qual, em um primeiro momento a abertura vai ser estimada pelo uso da Zona de Fresnel projetada usando um meio com velocidade constante e a profundidade do principal refletor. Ao passo que, com os atributos do operador CRS definidos, o empilhamento final é realizado novamente com base na zona de Fresnel projetada para a seção de afastamento nulo.

Note que se considerarmos na equação 2.6 o  $\Delta m = 0$ , voltaremos à equação 2.2, que é a relação matemática utilizada no empilhamento

convencional. Esta característica reforça a ideia de que o operador CRS está além do operador CMP.

Outra peculiaridade deste método de empilhamento é a forma como é realizada a escolha dos parâmetros que definem a curva de empilhamento (equação 2.6). Em regra geral, utiliza-se uma busca automatizada, e para esta tarefa, atualmente, existe uma grande variedade de opções. No capítulo 3 deste trabalho serão salientadas algumas dessas technicalidades.

### 2.3 EMPILHAMENTO MULTIFOCUS (MF)

O Multifocus é uma abordagem proposta por Berkovitch et. al. (1998), e está baseada na teoria do imageamento homeomórfico (Gelchinsky et. al., 1997). No MF, cada traço *zero offset* é construído pelo empilhamento de traços que necessariamente não pertencem à mesma família CMP, como no método CRS (supergather ou super famílias CMP), mas sim, ao par de fonte e receptor que estão dentro dos limites da super família. Sendo o alcance desta super família CMP determinado pelo tamanho da zona de Fresnel (Berkovitch e Belfer, 2008). O número de traços que pertencem a esta zona pode exceder significativamente o número de traços de um CMP. Esta característica permite um considerável aumento na relação sinal-ruído na seção empilhada.

No caso 2D, a correção do *moveout* expressa pelo operador MF (vide equação 2.13) é uma expansão tri-paramétrica do tempo de trânsito na vizinhança de um ponto central. Gerando assim, uma aproximação semelhante ao do raio paraxial. Cabe ainda salientar que os três parâmetros do operador MF são: o ângulo de emergência  $\beta$ , e os raios de curvatura  $R_{CRE}$  e  $R_{CEE}$  de duas frentes de ondas fundamentais que serão tratadas a seguir.

Em relação ao empilhamento MF, é válido ressaltar que o mesmo apresenta desempenho satisfatório com dados sísmicos de baixa cobertura ou com baixa razão sinal-ruído. Outra característica interessante é que o empilhamento MF está livre dos efeitos de estiramento no pulso sísmico, pois todos os eventos pertencentes a um CMP central devem ter os mesmos parâmetros, e assim, as curvas de *moveout* são paralelas em todos os eventos (Berkovitch e Belfer, 2008).

### 2.3.1 A correção do *moveout* no multifocus (MF)

Considerando o diagrama de raios da Figura 2.4, notamos a partida de um raio normal da superfície (especificamente do ponto  $X_0$ , o qual é chamado de ponto central) com um ângulo  $\beta$ , chega até o refletor incidindo no ponto  $O$ , e retorna novamente ao ponto de partida  $X_0$ . Um raio paraxial arbitrário parte da fonte cruzando o raio normal no ponto  $F$  e é registrado no receptor  $R$ . Neste caso,  $F$  pode ser considerada uma fonte fictícia da qual emanam duas frentes de onda. Além disso,  $\Delta X^+$  e  $\Delta X^-$  representam as distâncias entre a fonte e o receptor, respectivamente, em relação ao ponto central  $X_0$ .

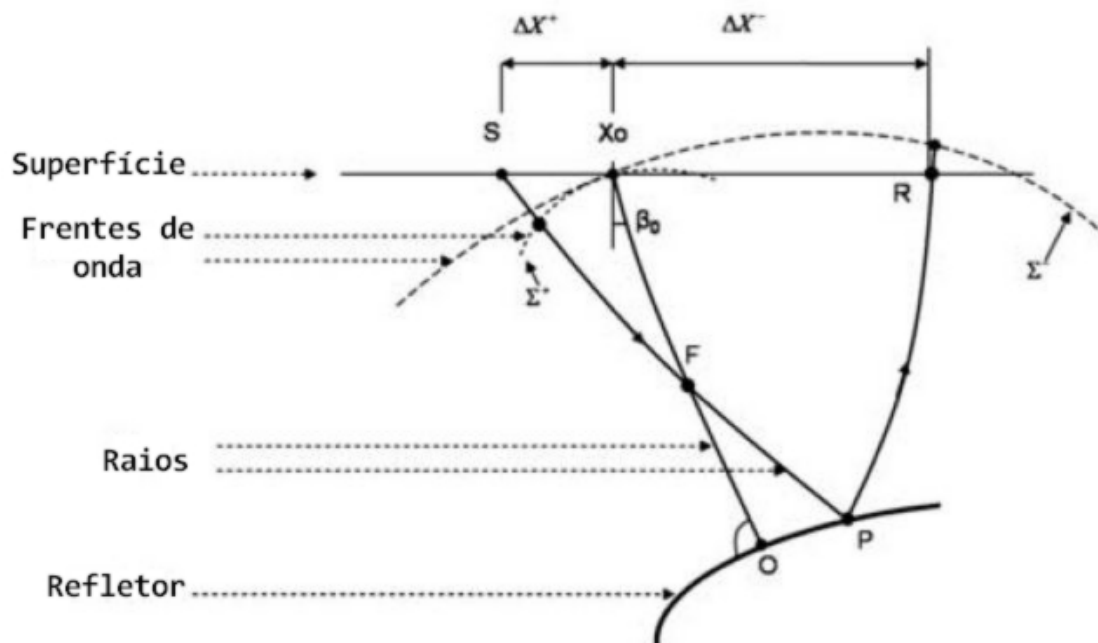


Figura 2.4: Uma representação esquemática do princípio de foco no método de empilhamento multifocus.

Um raio paraxial arbitrário parte da fonte cruzando o raio normal no ponto  $F$  e é registrado no receptor  $R$ . Neste caso, como já informado,  $F$  pode ser considerada uma fonte fictícia, que emana duas frentes de ondas. A primeira,  $\Sigma^+$  é emitida do ponto  $F$ , ascendentemente até a superfície (no ponto  $X_0$ ). A segunda,  $\Sigma^-$  é emitida do ponto  $F$ , descendentemente até o refletor, onde a mesma sofre reflexão e retorna a superfície (no ponto  $X_0$ ). A correção do *moveout* para uma configuração arbitrária de fonte e receptor na vizinhança

de um raio normal pode ser escrita, segundo Gelchinsky et. al. (1997), como a equação 2.13.

$$t_{MF}^2(\Delta m, h; \tau_0) = \tau_0 + D(\Delta m, h) + E(\Delta m, h) \quad 2.13$$

De forma que  $D$  e  $E$  são dados pelas equações 2.14 e 2.15,

$$D = [1 + 2F(\Delta m + h)\text{Sen}\beta_0 + F^2(\Delta m + h)^2 - 1]^{1/2} / V_0 F \quad 2.14$$

$$E = [1 + 2G(\Delta m - h)\text{Sen}\beta_0 + G^2(\Delta m - h)^2 - 1]^{1/2} / V_0 G \quad 2.15$$

$F$  e  $G$  são descritos nas equações 2.16 e 2.17

$$F = K_N + \sigma K_{NIP} / 1 + \sigma \quad 2.16$$

$$G = K_N - \sigma K_{NIP} / 1 - \sigma \quad 2.17$$

$\sigma$  é o parâmetro de foco denotado pela equação 2.18.

$$\sigma(\Delta m, h) = \frac{h}{\Delta m - K_{NIP}\text{Sen}\beta_0(\Delta m^2 - h^2)} \quad 2.18$$

Nas equações acima,  $K_N = 1/R_{CEE}$  e  $K_{NIP} = 1/R_{CRE}$  são os inversos dos raios de curvatura das frentes de ondas hipotéticas  $\Sigma^+$  e  $\Sigma^-$ .  $V_0$  é a velocidade próxima a superfície que é assumida como constante ao longo da linha sísmica

A frente de onda  $CEE$  (elemento evoluta comum), é formada pelo raio normal emitido por diferentes pontos no refletor, como um refletor explosivo, ver figura 2.5.

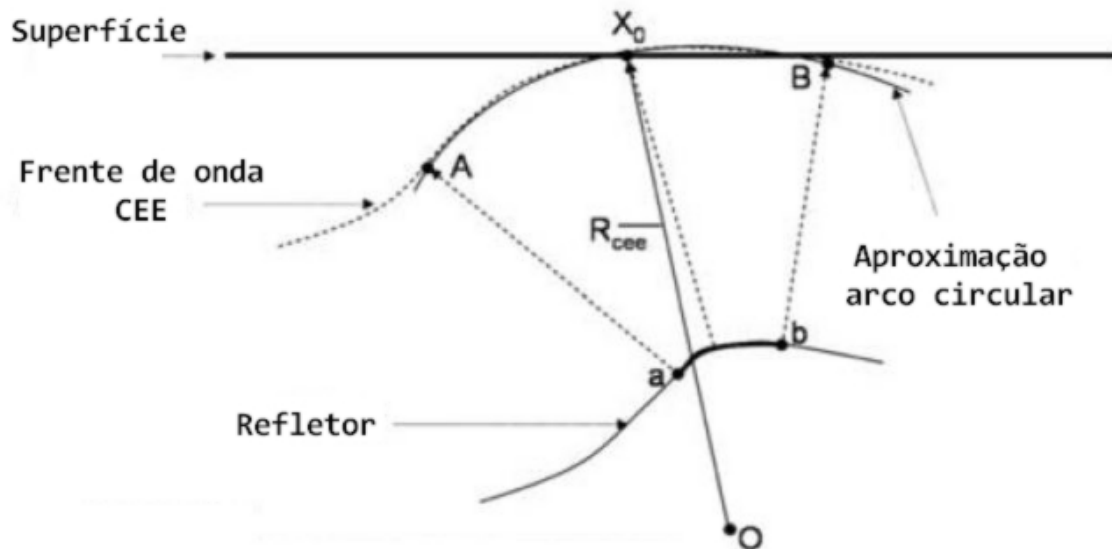


Figura 2.5: Uma representação esquemática da formação da frente de onda CEE.

A frente de onda *CRE* (elemento de reflexão comum), é formada por uma fonte pontual localizada sobre o refletor, onde um raio com afastamento nulo disparado do ponto central toca o mesmo, vide figura 2.6.

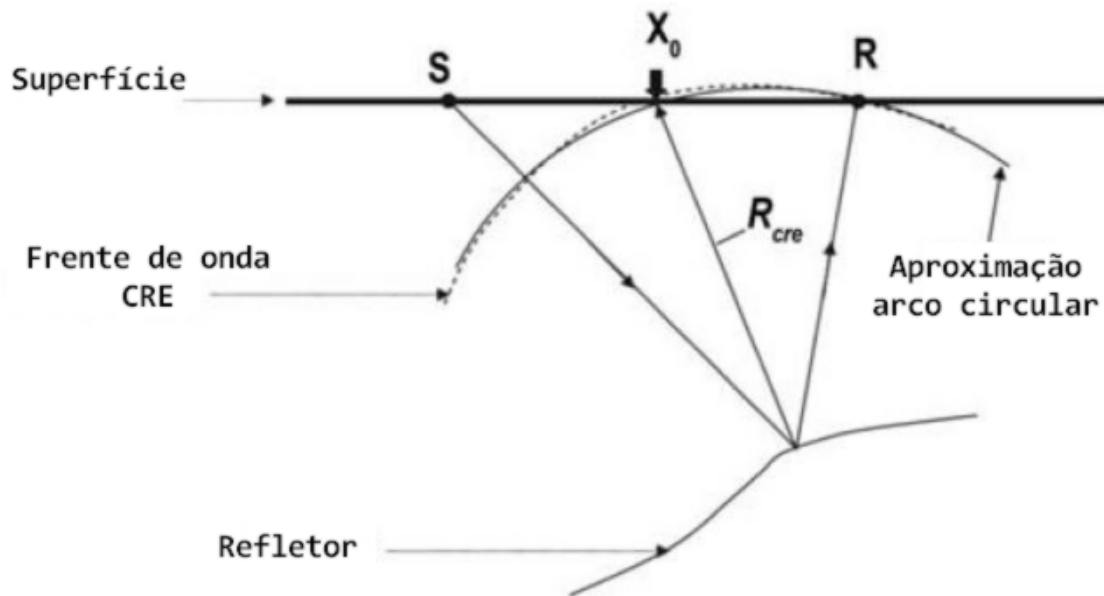


Figura 2.6: Uma representação esquemática da formação da frente de onda CRE.

Já o parâmetro  $\sigma$ , quando assume valor igual a zero significa que  $R^+ = R^- = R_{CEE}$ , que quer dizer que o ponto  $F$  coincide com o centro de curvatura da frente de onda normal, em outras palavras, situação *zero offset*.

Caso  $\sigma = 1$  e  $\sigma = -1$  implica que,  $R^- = 0$  e  $R^+ = 0$ , e corresponde aos arranjos sísmicos fonte comum e receptor comum.

A formatação do tempo de trânsito pelo empilhamento MF promove um adequado ajuste no tempo de registro para uma arbitrária configuração de fonte e receptor. No entanto, quando se analisa um simples CMP, a equação de correção do *moveout* feita pelo MF recai sobre a equação da hipérbole deslocada (equação 2.14), demonstrada por de Bazelaire (1988).

$$t = \tau_0 - t_p + \sqrt{t_p^2 + x^2/V^2} \quad 2.14$$

A equação 2.14 é uma abordagem alternativa para a correção NMO, e em termos de precisão é superior à equação 2.2, porque não se trata de uma simples expansão hiperbólica em série da equação 2.1, mas sim, uma aproximação de quarta ordem para um dado que ainda guarda características hiperbólicas (Berkovitch e Belfer, 2008). A equação 2.14 é computacionalmente mais custosa, haja vista que existe a necessidade de determinar os parâmetros  $t_p$ , referente ao tempo da hipérbole deslocada, e  $V$ . No entanto, em casos de pequenos afastamentos o termo  $V$  pode ser substituído pela velocidade próxima à superfície, tornando a aproximação robusta e dependente de um só parâmetro.

Os parâmetros do operador de empilhamento MF são suscetíveis a uma busca automatizada, como no caso anterior, dos atributos CRS. E pela mesma razão, este tópico voltará a ser debatido no capítulo três.

### 3. DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DE EMPILHAMENTO

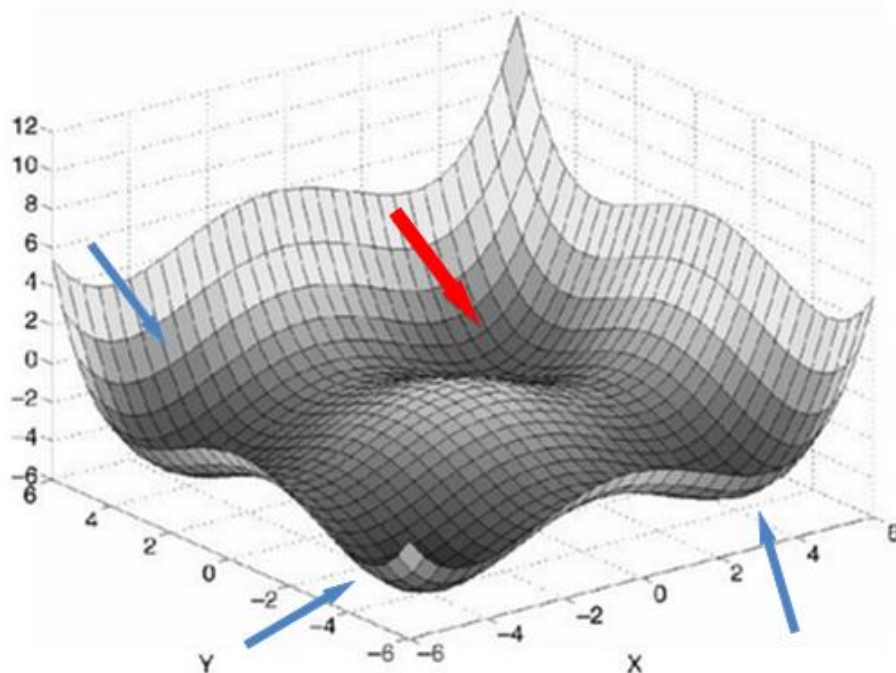
No presente capítulo, serão abordados os aspectos gerais da teoria de otimização, assim como da função-objeto utilizada no empilhamento de dados para diferentes alternativas de empilhamento. Ato contínuo, direcionar-se-á e apresentar-se-á estratégias de métodos de busca, ressaltando também as peculiaridades essenciais de tais métodos aqui introduzidos.

#### 3.1 OTIMIZAÇÃO EM SEUS ASPECTOS GERAIS

Em seu aspecto mais genérico, a otimização pode ser admitida como um processo que busca encontrar a melhor solução dentre um conjunto de  $n$  outras possíveis soluções. Com o advento do contínuo avanço da capacidade de processamento dos computadores, torna-se admissível a implementação de diversas técnicas de otimização, sendo estas ferramentas importantes e vastamente utilizadas quando não existe uma solução simples e diretamente calculável para o problema.

Em suma, o objetivo da otimização consiste em localizar os máximos, ou mínimos, de uma função de várias variáveis com valores dentro de uma determinada região do espaço multidimensional, a um baixo custo computacional, ou seja, que esta tarefa seja realizada de forma rápida, e utilizando o mínimo da capacidade de processamento possível. A função  $f(p)$  a ser otimizada, é chamada de função-objeto, que em regra geral, representa uma função contínua de  $n$  variáveis independentes  $p = (p_1, \dots, p_n)$ , que por sua vez, define um espaço de busca de dimensão  $n$ . Maximizar  $f(p)$  em uma região qualquer do espaço de  $n$  dimensões é equivalente a minimizar  $-f(p)$  no mesmo espaço, e por esta razão, estabeleço que desde agora em diante usarei apenas o termo minimização. Ratificando, a tarefa de otimização é encontrar os vetores  $p^*$  que minimizem a função-objeto. Com os vetores sendo denominados de minimizadores ou pontos ótimos e os valores relacionados à  $f(p^*)$  classificados como mínimos do problema ou valores ótimos.

Para algumas aplicações, a função-objeto pode ser bastante complexa e caracterizada pela presença de vários máximos e mínimos, ver Figura 3.1. Neste caso, as funções são denominadas de funções multimodais, sendo o mínimo de todos os mínimos denominado de mínimo global, e os demais, de mínimos locais.



**Figura 3.1:** Função genérica que visa estabelecer um conceito intuitivo de uma função multimodal, salientando com as setas em azuis os mínimos locais e em vermelho o mínimo global.

O algoritmo de otimização local visa estabelecer o local de mínimo nas imediações da solução inicial ou do valor inicial, geralmente definido pelo usuário. Em via de regra, a grande maioria das técnicas de busca local são determinísticas, além de apresentarem propriedades locais da função-objeto para calcular uma atualização da solução da presente iteração e procurar no sentido de mínimo a solução final. É natural que este tipo de algoritmo não encontre o mínimo global da função, no entanto, caso o ponto de partida utilizado no algoritmo seja eventualmente próximo ao mínimo global, nada impede que o mesmo seja encontrado. Já a técnica de minimização global objetiva encontrar o mínimo global de uma função-objeto multimodal, tendo como característica digna de destaque, segundo Garabito (2001), o fato de serem estocástico e usarem informação global pertinentes à função-objeto para

atualizar o valor de mínimo na corrente iteração. É interessante como a convergência das técnicas de minimização global não é garantida, muito embora os algoritmos de busca quase sempre localizam a solução ótima sem o auxílio de um bom ponto de partida. Outra faceta deste assunto é a real interdependência entre o comportamento da função-objeto e a convergência das técnicas de minimização global, de maneira que, quanto maior a suavidade da função-objeto, maior será a facilidade em localização do ponto de mínimo global e quanto maior for o número de mínimos locais (função-objeto menos suave), mais custosa será a busca do mínimo global.

Diversas técnicas para resolver o problema de otimização global têm recebido certo destaque, segundo Press (1997), é possível escolher métodos de minimização que armazenem na ordem  $N^2$  e outros na ordem  $N$ , em que  $N$  é o número de dimensões da função  $f$  a ser minimizada. Todavia, para valores moderados de  $N$  e para quantidades razoáveis de armazenamento, estes métodos não serão um grande problema. Haverá, no entanto, caso de aplicações ocasionais onde o armazenamento atinja valores críticos.

O método *downhill simplex*, desenvolvido por Nelder e Meal, tende a realizar a minimização no sentido descendente da função, sem fazer grandes considerações acerca da função a ser minimizada. Sobre esta alternativa, é interessante mencionar que pode ser extremamente lento, assim como, pode ser extremamente robusto. Seu desempenho é satisfatório quando o cálculo de minimização é apenas parte acessória do problema global. A ordem de armazenamento deste método é de  $N^2$ , e os cálculos das derivadas não são necessários.

Opção alternativa são os métodos de direções conjugadas, no qual podemos destacar o método de Powell. Esta classe de métodos é composta por escolhas aplicadas quando não se calcula facilmente o valor das derivadas. Este método também apresenta a necessidade de uma subrotina de minimização unidimensional, e seu armazenamento é da ordem de  $N^2$ .

Fora esses, ainda existem duas famílias de algoritmos de minimização de funções multidimensionais que dependem do cálculo da primeira derivada. Sendo que ambas necessitam da subrotina de minimização unidimensional.

- A primeira, denominada de método por gradiente conjugado, que apenas necessita do armazenamento de ordem  $N$ , do cálculo das derivadas e de uma subrotina capaz de realizar minimizações unidimensionais.
- A segunda, denominada de método de minimização Quase-Newton, que por sua vez requer o armazenamento na ordem de  $N^2$ , dos cálculos das derivadas e de uma subrotina capaz de realizar minimizações unidimensionais.

É importante frisar também que não existe uma família de algoritmo que se sobreponha à outra, o que de fato existe é a melhor adequação de determinada metodologia ao problema em questão.

### 3.2 A FUNÇÃO-OBJETO NOS MÉTODOS DE EMPILHAMENTO

Nesta etapa do trabalho, a intenção é introduzir a função-objeto usada pelos algoritmos de otimização. Esta, por sua vez, avaliará a qualidade dos vetores de parâmetros, ou pontos ótimos do operador de empilhamento a serem selecionados a partir dos dados sísmicos de multicobertura. Segundo Neidell e Taner (1971), o critério de coerência a ser utilizado é o *semblance*, que representa uma medida da razão entre a energia do sinal depois da somatória dos traços e a energia acumulada de todos os traços envolvidos na somatória, expressa pela equação 3.1.

$$S = \frac{\sum_t \left( \sum_{i=1}^M U_{i,t(i)} \right)^2}{M \sum_t \sum_{i=t}^M U_{i,t(i)}^2} \quad 3.1$$

De maneira que,  $U_{i,t(i)}$  representa a amplitude do sinal sísmico indexado pelo seu respectivo traço sísmico,  $i = 1, \dots, M$ , e a trajetória de empilhamento,  $t(i)$ .  $M$  significa o número de traços e  $\Sigma$  refere-se a somatória que é feita dentro de uma janela temporal em relação à trajetória de empilhamento central. A

equação 3.1 descreve uma curva de empilhamento, que está vinculada com os operadores de empilhamento (equação 2.2, 2.6 e 2.13), introduzidas no capítulo anterior.

O *semblance* é uma medida de coerência normalizada e que apresenta amplitudes máximas variando de 0 a 1. Em um problema de minimização como o abordado neste trabalho, é natural que o valor da coerência obtido seja negativo, isso se justifica pelo fato da convenção matemática adotada no início deste capítulo ter a forma de uma função  $-f(p)$ , a ser minimizada.

Para que se obtenha o valor do coeficiente da equação 3.1, admi-se que a busca pelos parâmetros ótimos dos operadores de empilhamento, para cada ponto  $x_0$  do dado multicobertura, apresenta como alternativa a possibilidade de busca segmentada. No entanto, como reflexo desta opção temos o aumento do custo computacional em termos de pontos flutuantes e também de fluxo dos dados em processamento.

Um método de otimização global certamente poderia se sobrepôr a este problema, mesmo que as derivadas da função *semblance* tornem-se cada vez menos explícitas e os esquemas de minimização baseado nos gradientes sejam impraticáveis. Nestas condições, uma alternativa que mantém boa convergência sem o cálculo dos gradientes é a metodologia de minimização por direções conjugadas, junto com o confiável algoritmo de busca unidimensional

Outra sutileza interessante está vinculada a equação 3.1, a qual remete a não precisão dos algoritmos que realizam a minimização da função-objeto baseada em buscas por direções descendentes; desta peculiaridade está associada à grande quantidade de mínimos locais da função, que neste caso é o *semblance*.

### 3.3 MÉTODO DE OTIMIZAÇÃO POWELL

O método de otimização Powell está associado às escolhas de direções sucessivas, sem a prerrogativa do cálculo das derivadas. Essas escolhas são realizadas com embasamento na metodologia de direções conjugadas, de maneira que com o uso deste método, adquire-se um significativo aumento na velocidade da taxa de convergência no sentido decrescente, mais contundentemente, no sentido do mínimo global. No caso de funções que descrevem um comportamento convexo, as iterações chegam a convergir de forma quadrática, a partir de qualquer ponto inicial. Nestas condições, o método de Powell (1964) apresenta exatamente como resultado da  $n$ ésima iteração o minimizador de  $f(p)$  sobre o  $r_i$  conjunto de direções conjugadas no espaço de atributo. Mais precisamente, se  $n$  vetores não triviais  $r_i$ ,  $i = 0, 1, \dots, n - 1$ , mutuamente conjugados, o mínimo exato de  $f(p)$  pode ser obtido pela sequência de  $n$  unidimensional buscas. Para tal tarefa, Inicia-se no ponto  $p_0$ , o resultado final  $p_{min} = p_n$  extraído da equação 3.2

$$f(p_{i+1}) = \min_{\alpha_i \geq 0} f(p_i + \alpha_i r_i), \quad i = 0, 1, \dots, n - 1. \quad 3.2$$

É interessante ressaltar que o método de Powell apresenta um comportamento de minimização satisfatório, mesmo em regiões com elevado número de mínimos locais, como é o caso da função multimodal  $f(p)$ , Marchetti, (2009).

É interessante mencionar também que o conjunto de direções conjugadas  $r_i$ ,  $i = 0, 1, \dots, n - 1$  pode ser definido de maneira interativa a partir de uma família de  $n$  vetores linearmente independentes  $q_i$ , desta forma, a designação da direção conjugada e do processo de minimização podem ser realizadas na mesma iteração.

Para compreensão mais detalhada sobre o método de otimização Powell, sugiro como leitura complementar Powell (1964)

### 3.3.1 Algoritmo Powell de Direções Conjugadas

Para cada coordenada  $(\tau_0, \Delta_m, h)$  do volume de dados, o algoritmo de minimização pode ser esboçada da seguinte maneira:

1. Inicialize: o vetor  $p_0$ ,  $h_0 = f(p_0)$  e escolha  $q_0, q_1, \dots, q_{n-1}$  linearmente independente.
2. Para  $0 \leq i \leq n - 1$  Faça
  - Busca unidimensional: encontre  $\alpha_{LB} \leq \alpha_i \leq \alpha_{UB}$  minimizando  $h(\alpha) = f(p_i + \alpha q_i)$
  - Defina o novo ponto:  $p_{i+1} = p_i + \alpha_i q_i$
  - Defina  $h_{i+1} = h(\alpha_i)$
3. Encontre um inteiro  $0 \leq k \leq n - 1$ , de forma que  $\Delta = h_k - h_{k+1}$  seja máximo
4. Calcule:  $f_3 = f_s(2p_n - p_0)$  e defina  $f_1 = h_0$  e  $f_2 = h_n$
5. Se  $f_3 < f_1$  e  $(f_1 - 2f_2 + f_3)(f_1 - f_2 - \Delta)^2 < \frac{1}{2}\Delta(f_1 - f_3)^2$  Então
  - Defina uma nova direção  $q_k = x_n - x_0$
  - Busca unidimensional: encontre  $\alpha_{LB} \leq \alpha_k \leq \alpha_{UB}$  minimizando  $h(\alpha) = f(p_n + \alpha q_k)$
  - Defina o novo ponto:  $p_0 = p_n + \alpha_k q_k$

Senão

- Mantenha todas as direções  $q_0, q_1, \dots, q_{n-1}$  para a próxima iteração e defina  $p_0 = p_n$
6. Repita os passos 2 a 5, até que a convergência seja alcançada.

Consta como etapa inicial do algoritmo a atribuição dos valores para o ponto de partida  $(p_{i=0}, \dots, p_{n-1})$  da função que será minimizada  $(f(p_i))$ , juntamente com a definição das  $n$  dimensões de busca  $(q_{i=0}, q_1, \dots, q_{n-1})$ .

Em etapa secundária, o algoritmo realiza uma busca unidimensional visando estabelecer o elemento linear  $\alpha_i$  que minimiza a função  $f(p_i)$  na dimensão  $q_i$ . Redefinindo posteriormente um novo ponto de avaliação ( $p_{i+1}$ ) no processo de minimização.

O terceiro passo do algoritmo tem como objetivo encontrar um número inteiro, não negativo, de forma que o valor da variação  $\Delta = h_k - h_{k+1}$  seja máxima.

O quarto passo vem a realizar o cálculo da função em três pontos distintos.

Para que posteriormente, no quinto passo, o algoritmo realize uma avaliação nos pontos anteriormente calculados, visando estabelecer se a minimização deve definir nova direção de busca e novo minimizador unidimensional. Caso contrário, o algoritmo mantém as direções  $q_0, q_1, \dots, q_n$  para as próximas iterações, até que a convergência desejada seja alcançada.

De acordo com a equação 3.2, o objetivo da busca unidimensional é realizar a minimização de  $h(\alpha) = f(p + \alpha q)$  ao longo da direção  $q$  variando o comprimento do passo  $\alpha_{LB} \leq \alpha \leq \alpha_{UB}$ . Para determinar um novo ponto  $x + \alpha q$ , uma regra de seleção eficaz que se molda ao comprimento do passo durante cada iteração de minimização deve ser cuidadosamente implementada. Segundo Minoux, (1983) uma escolha apropriada são as condições de Wolfe-Powell, que representa uma adequação robusta e segura deste processo. A única pré condição para ser avaliada é que  $\dot{h}(0) \leq 0$ , então  $q$  apresenta direção localmente descendente. Infelizmente, a busca por uma boa solução no processo de minimização de uma função multimodal tem a possibilidade de uma convergência prematura, ou seja, a escolha de um mínimo local.

### 3.4 MÉTODO DE MINIMIZAÇÃO QUASE-NEWTON

O Objetivo do método de minimização Quase-newton não é diferente do objetivo dos métodos de gradiente conjugado, que é realizar o acúmulo de informações por sucessivas minimizações unidimensionais, de forma que, tais

minimizacões conduzam ao mínimo da função. Neste caso, o método também irá apresentar convergência quadrática para funções suaves.

Tanto o método Quase-Newton quanto métodos por gradiente conjugado necessitam calcular o gradiente da função, ou as primeiras derivadas parciais, em pontos arbitrários. Entendo que a abordagem do método Quase-Newton difere dos métodos por gradiente conjugado no que tange ao armazenamento e atualização de informações que se acumula. Ao invés de requerer o armazenamento de ordem  $N$ , o mesmo requer uma matriz de ordem  $N \times N$ .

A idéia básica do método Quase-Newton é construir, iterativamente, uma boa aproximação da matriz inversa Hessian  $A^{-1}$ , que é construído por uma sequência de matrizes  $H_i$ , com propriedade demonstrada pela relação 3.3

$$\lim_{i \rightarrow \infty} H_i = A^{-1} \quad 3.3$$

No método Quase-Newton a matriz Hessian, que é a segunda derivada da função  $f$  a ser minimizada, não precisa ser calculada. A matriz Hessian é atualizada pelas sucessivas análises do gradiente de  $f$ , que é a primeira derivada da função.

Para mais detalhes sobre o método de otimização Quase-Newton, sugiro como leitura alternativa Nocedal (1980).

### 3.4.1 Algoritmo de Minimização Quase-Newton

Dado um ponto de partida  $(p_{n=0}, \dots, p_{n-1}) \in \text{dom } f(p_n)$

Para  $n = 1, \dots, n - 1$

1. Calcule a direção Quase-Newton  $\Delta p = -H_{n-1}^{-1} \nabla f(p(n-1))$
2. Determine o tamanho do passo  $\delta$  (por meio de uma subrotina de minimização)

3. Calcule  $p(n) = p(n - 1) + \delta\Delta p$
4. Calcule  $H_n$

## 4. EXEMPLOS NUMÉRICOS DAS METODOLOGIAS DE OTIMIZAÇÃO

Neste capítulo será primeiramente introduzido o dado sintético utilizado para os testes das metodologias apresentadas no capítulo anterior. Posteriormente é testado o desempenho e a eficiência das técnicas de otimização, já introduzidas. De forma conclusiva realizo uma avaliação dos resultados obtidos com a aplicação destas metodologias, de maneira que saliento os pontos positivos e negativos dos resultados alcançados.

### 4.1 O DADO SINTÉTICO 2D MARMOUSI

O modelo Marmousi está fundamentado em um perfil geológico da bacia de Cuanza, na Angola. A partir desta geologia, e através do programa MIMIC™ do pacote SIERRA gerou-se um modelo com 160 camadas, veja Figura 4.1. Tendo as distribuições de velocidades e densidades definidas pela introdução dos gradientes de velocidades horizontais e verticais, acompanhe Figura 4.2, a distribuição de velocidade na zona mais superficial do modelo tem um elevado gradiente vertical e também uma intensa compactação. O modelo Marmousi foi gerado com uma malha 2D de velocidade/densidade apresentando dimensões de 9200m na horizontal por 3000m de profundidade, e com um comprimento de malha quadrada de aresta de 4m.

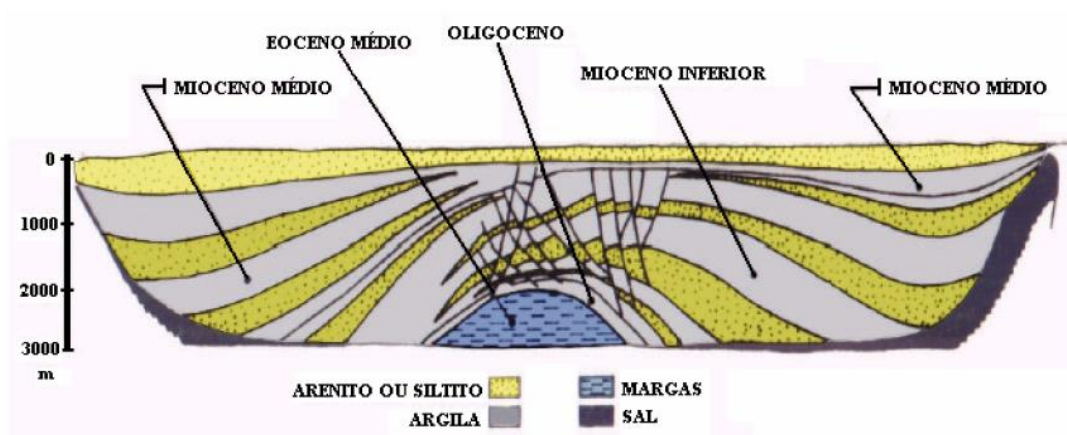


Figura 4.1: Perfil geológico da bacia de Cuanza, Angola, utilizado para construção do modelo Marmousi.

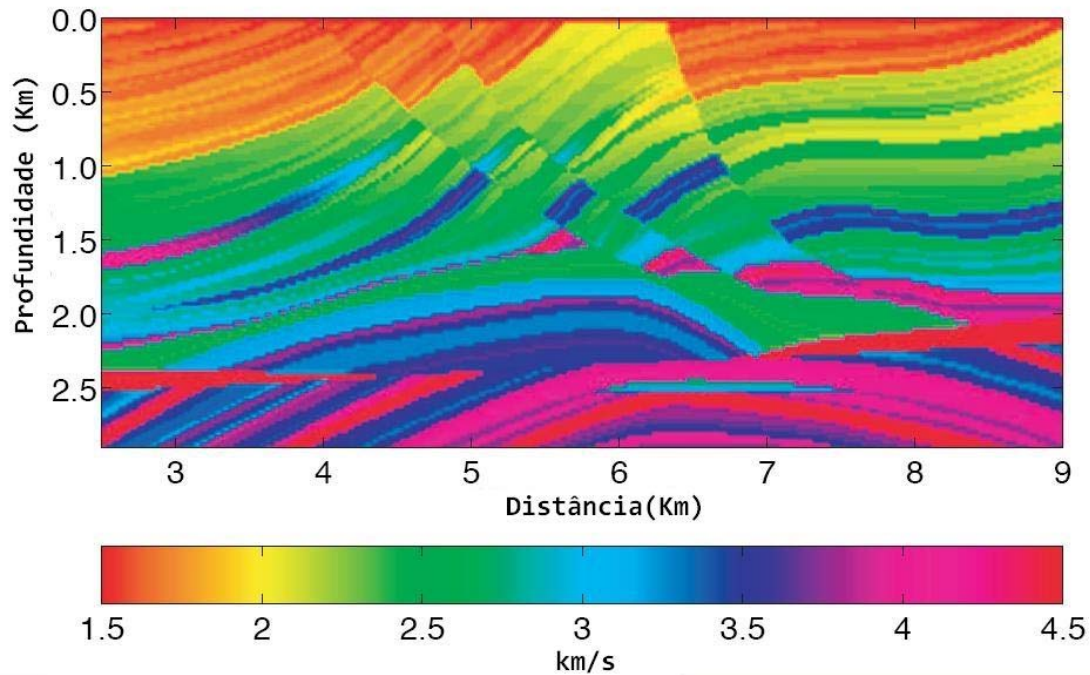


Figura 4.2: Modelo de velocidades dos dados sísmicos Marmousi.

Segundo Bourgeois et al. (1991), a geologia do modelo Marmousi apresenta um intervalo de sedimentação deltaica com espaçamento de oeste para leste, depositado sobre uma série de evaporitos salíferos. A zona geológica oriental do modelo tem indícios de ter sido mais afetada pela movimentação lateral do deslizamento da camada de sal, chegando a desenvolver falhas normais. Uma armadilha estrutural de hidrocarbonetos é esperada devido à ocorrência de depósitos carbonáticos plataformais dobrados.

A história geológica vinculada ao perfil geológico pode ser descrita em duas faces distintas:

- Faces 1: Corresponde a uma contínua sedimentação plataformal (de margas e carbonatos), que no final desta sedimentação os depósitos foram suavemente dobrados e então erodidos (com a superfície de erosão sendo plana).
- Faces 2: Iniciou-se com a deposição de uma série de evaporitos salíferos. Nesta série outras Faces ricas em argilas e margas com

matéria orgânica foi depositada. Em seguida foram depositadas Faces espessas de sedimentos detríticos de folhelhos e arenitos, cujas espessuras das Faces são controladas pelas ocorrências de deslocamentos laterais contínuos no sal, resultante da pressão de sobrecarga. Tais deslizamentos da camada de sal podem causar, localmente, o desaparecimento de sal e também são responsáveis pelo aparecimento de falhas e ativamento das mesmas durante a deposição dos sedimentos detríticos.

O aspecto da prospecção de petróleo no modelo Marmousi tem como base duas séries de sedimentos:

- Primeira Série (sedimentos detríticos): as armadilhas foram formadas pelas estruturas ligadas à tectônica de sal dificultada pelas falhas envolvidas. O abastecimento de hidrocarbonetos nos arenitos é realizado pela ascensão da série de rocha geradora pós-evaporítica.
- Segunda Série (antissalíferos): está mais abaixo da primeira e tem uma elevada quantidade de estruturas anticlinais na ausência do sal (que desaparece pelo deslizamento lateral), onde este foi suprido pelo rebaixamento da cobertura da série de rocha geradora.

Os três poços para os quais os dados foram disponibilizados atravessam uma sequência sedimentar sem falhas, na qual as rochas geradoras, folhelhos e margas, são ausentes.

O conjunto de dados sísmicos Marmousi é simulado de acordo com a geometria *end on*, de forma que o incremento no espaçamento entre as fontes é de 25m, realizado de oeste para leste sob a linha sísmica. A primeira e a última coordenada da fonte sísmica estão localizadas, respectivamente, na posição 3000m e 8975m, a partir da extremidade oeste do modelo, o que totaliza 240 disparos. Ainda em relação à fonte sísmica, ela é formada por um arranjo de 6 canhões de ar comprimido distribuídos em uma extensão de 40 m, a distância entre cada canhão é de 8m. O conjunto das fontes sísmicas está ligeiramente submerso, em torno de 8m, e para fins do processamento sísmico sua posição é considerada o meio do conjunto dos 6 canhões. Todas as fontes emitem o mesmo pulso e disparam simultaneamente. O pulso sísmico dos canhões marinhos é obtido através da digitalização de um pulso sísmico real

utilizado no campo, que é filtrado com um filtro trapezoidal de frequência (0, 10, 40, 60Hz). Aplicando este filtro, tem-se aproximadamente o mesmo efeito de um filtro passa-baixa aplicado durante o registro.

O streamer possui um arranjo de receptores contendo 96 grupos de hidrofones a uma profundidade de 12m. A distância entre os grupos consecutivos de hidrofones é de 25m. O grupo mais próximo da fonte está a uma distância de 200m, também conhecido como menor afastamento (*near offset*), e o mais longe a 2575m, amplamente difundido como maior afastamento (*far offset*). Cada grupo de hidrofones consiste de 5 hidrofones com uma distância de 4m entre cada um, e o traço sísmico para cada grupo é obtido através soma dos traços dos 5 hidrofones. A respeito do traço sísmico é interessante salientar que a taxa de amostragem e o tempo total de registro são de 4ms e 3s, respectivamente.

O modelo sintético 2D Marmousi vem sendo testado com distintos objetivos pela comunidade geofísica, no entanto, nenhum desses resultados conseguiu reproduzir uma imagem correta da zona alvo (BILLETTE et al. 2003). As principais dificuldades são a complexidade estrutural do modelo, associada com o efeito das múltiplas, que por sua vez são difíceis de serem atenuadas.

Como não faz parte do objetivo deste trabalho desafiar esses dois problemas simultaneamente, opto por utilizar uma variação do dado Marmousi, trata-se do dado Marmousoft.

## 4.2 O DADO SINTÉTICO 2D MARMOUSHOFT

Utilizo o dado marmousoft para testar o desempenho e a eficiência das técnicas de otimização implementadas neste trabalho. Este dado sintético é considerado uma simplificação do dado Marmousi, característica essa adquirida pela modelagem Ray Born aplicada sobre o próprio dado Marmousi, que resulta na combinação de um modelo de velocidades suavizado com a refletividade de complexas estruturas. Costa et al.(2008) afirma que esta suavização é alcançada pela aplicação de um filtro de minimização Gaussiano.

É possível ratificar a suavização do modelo de velocidades no dado marmousoft quando se analisa, de forma contrastante, a Figura 4.3 com a Figura 4.2. Sobre o ponto de vista desta análise é perceptível como a distribuição da velocidade na Figura 4.3 fica muito menos complexa, ou seja, suave em relação à Figura 4.2.

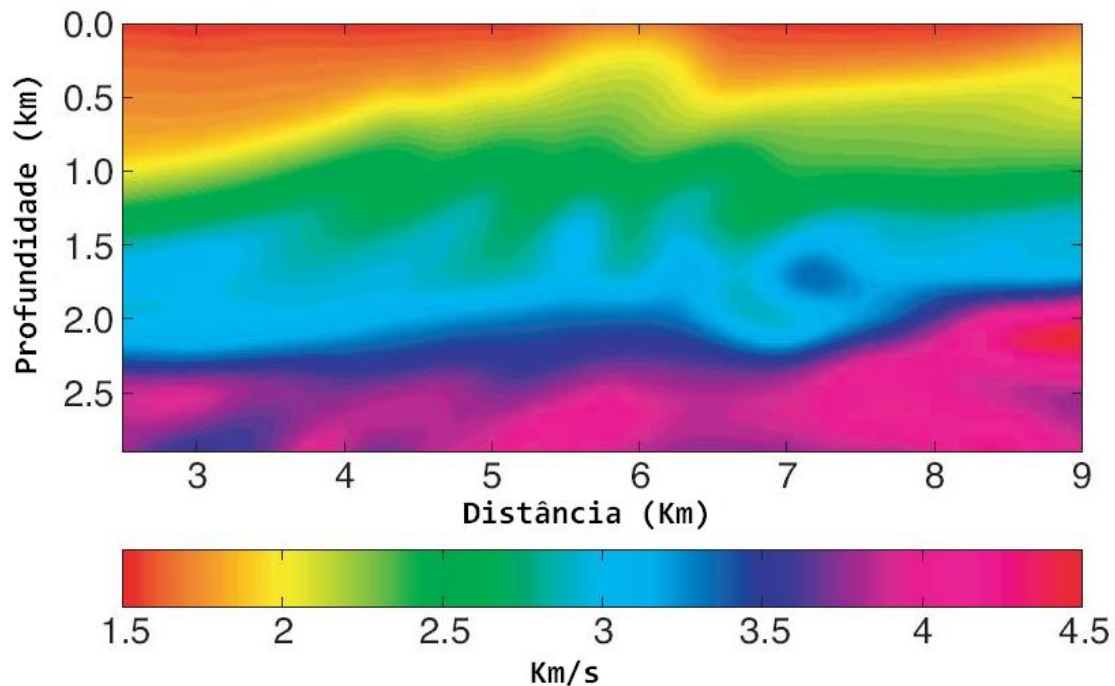


Figura 4.3: Modelo de velocidades do dado sintético Marmousoft.

Segundo Billette et al.(2003), a simulação do levantamento sísmico do marmousoft consiste de 261 tiros registrados por 96 geofones, espaçados de 25m. As distâncias mínima e máxima deste dado são de 100m e 2450m, respectivamente. O intervalo de amostragem deste dado é de 4ms. Sendo também aplicado ao dado um silenciamento nas famílias tiro comum para remover as ondas diretas.

### 4.3 RESULTADOS DO EMPILHAMENTO CRS

Antes de apresentar os resultados obtidos com a implementação das metodologias de otimização Powell e Quase-Newton, julgo ser interessante salientar a Figura 4.4, trata-se da seção de menor afastamento do dado Marmousoft.

A introdução da Figura 4.4 é importante, pois a mesma vai direcionar as perspectivas dos resultados de empilhamento sísmico, tanto com a metodologia Powell, quanto com a Quase-Newton. Enfatizando a ideia de que o empilhamento vai reproduzir um traço sísmico referente a um par formado por fonte e receptor com afastamento nulo, em que a fonte e o receptor são coincidentes (registro sísmico fisicamente impossível). A análise do registro sísmico de menor afastamento faz com que os resultados obtidos no empilhamento sísmico apresentem, mesmo que em linhas gerais, um aspecto semelhante à imagem da Figura 4.4.

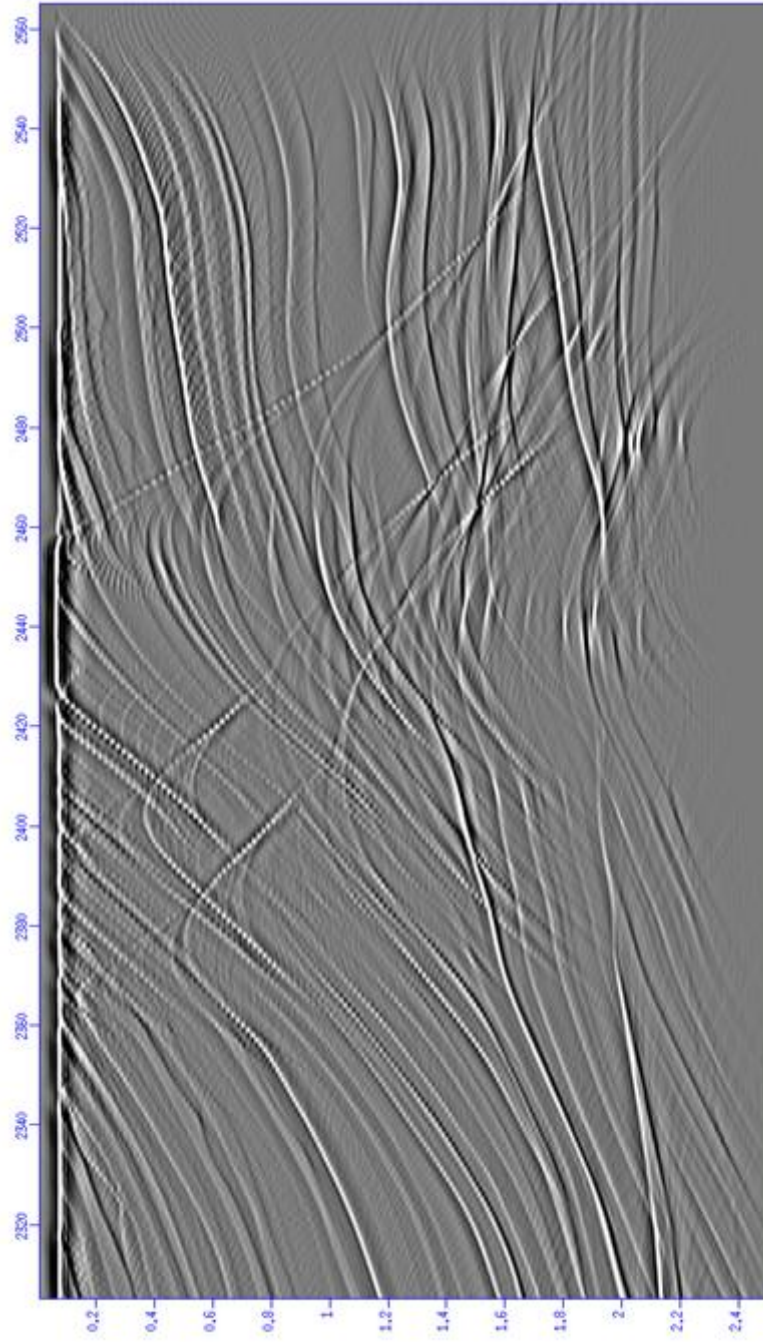


Figura 4.4: seção de menor afastamento do dado Marmousoft (100m).

### 4.3.1 Empilhamento CRS Utilizando a Metodologia de Otimização Powell

Através da metodologia Powell, obtive as seções dos parâmetros cinemáticos associados ao operador CRS (vide Figuras 4.5, 4.6 e 4.7), assim como a seção semblance (Figura 4.8) e a própria seção empilhada (Figura 4.9).

A cerca das seções dos parâmetros cinemáticos é interessante ressaltar que:

A Figura 4.5 é o parâmetro da vagarosidade, este, por sua vez, ligado ao ângulo de emergência ( $\beta_0$ ) do raio registrado na superfície.

A Figura 4.6 é a seção do parâmetro que se relaciona com a curvatura do evento com respeito a distancia do CMP central, também conhecida como velocidade ( $v_{NMO}$ ) ou o raio de curvatura da onda NIP ( $R_{NIP}$ ).

A Figura 4.7 é a seção do parâmetro que está vinculada com a curvatura do evento, agora já *zero offset*, com relação à coordenada do ponto médio, também conhecida como velocidade ( $v_{CMO}$ ) ou o raio de curvatura da onda NIP ( $R_N$ )

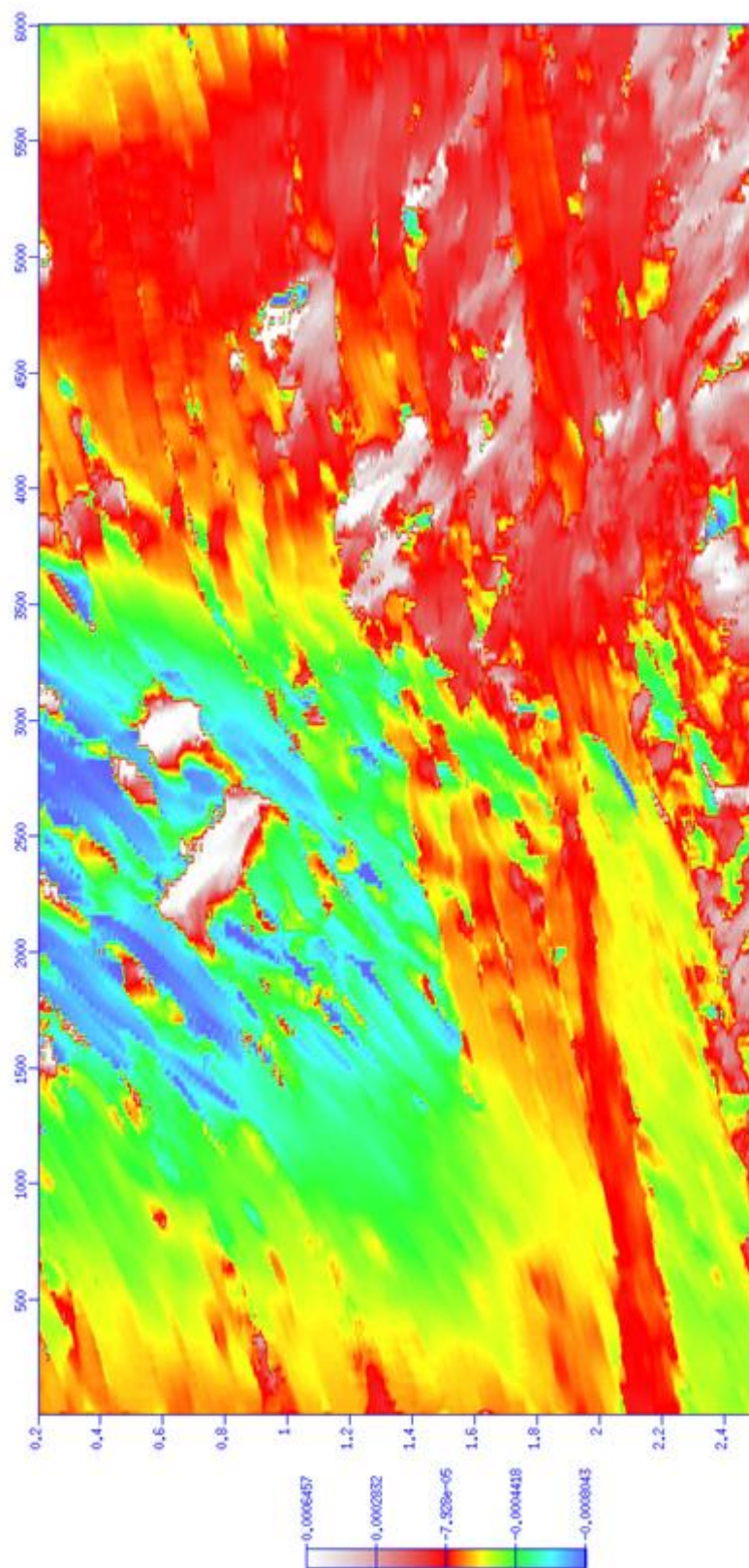


Figura 4.5: Seção CRS do ângulo de emergência (método de otimização Powell).

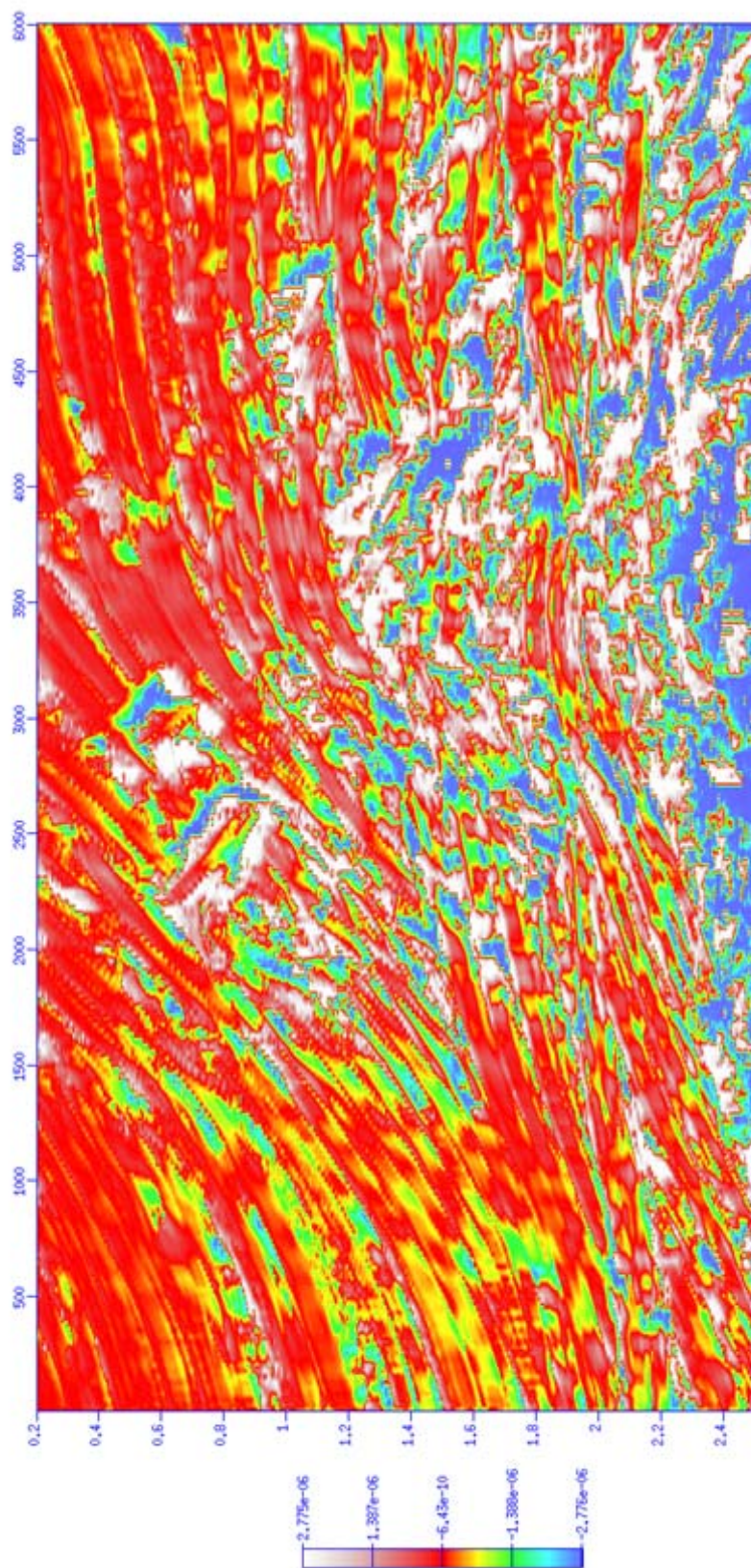


Figura 4.6: Seção CRS do raio de curvatura da onda NIP (método de otimização Powell).

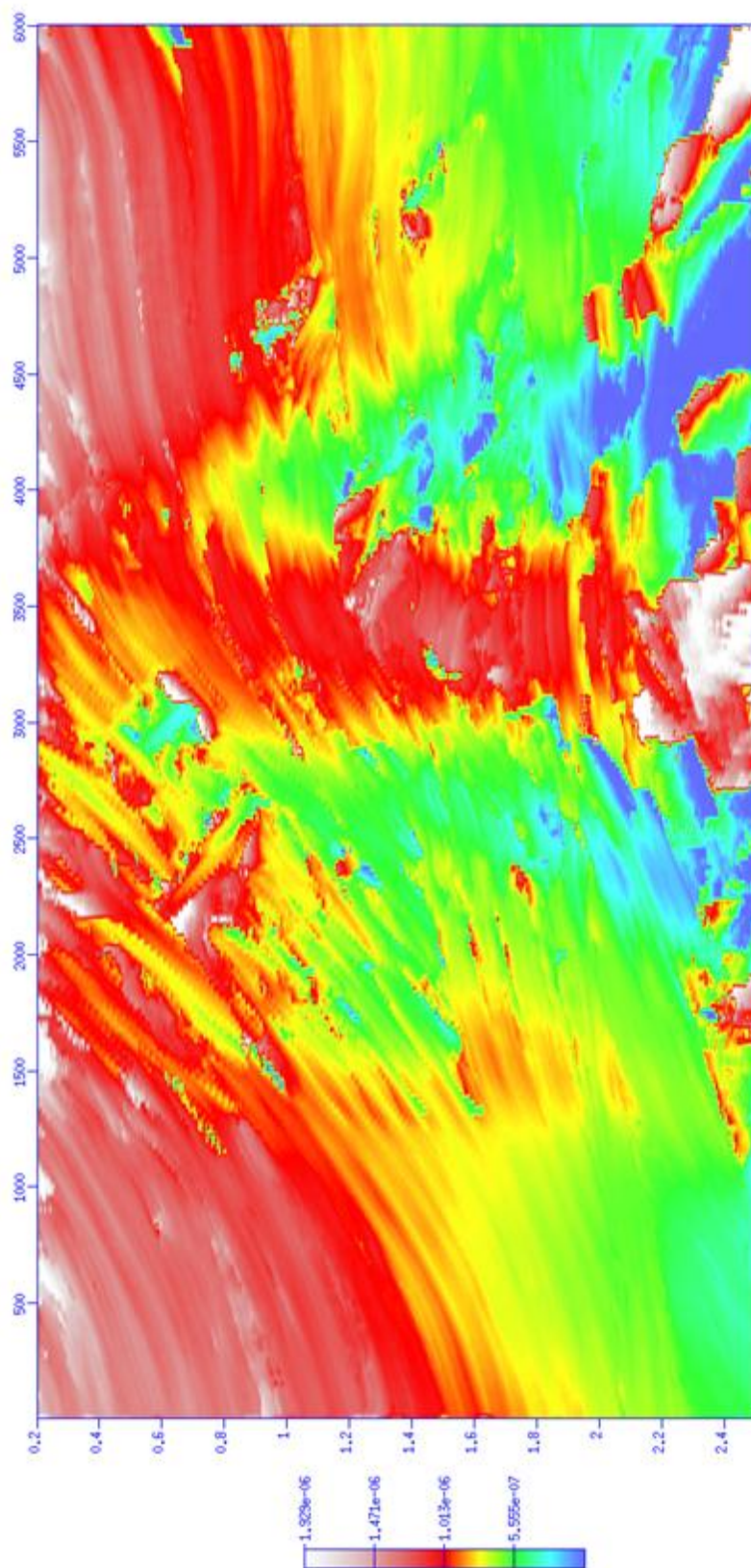


Figura 4.7: Seção CRS do raio de curvatura da onda N (método de otimização Powell).

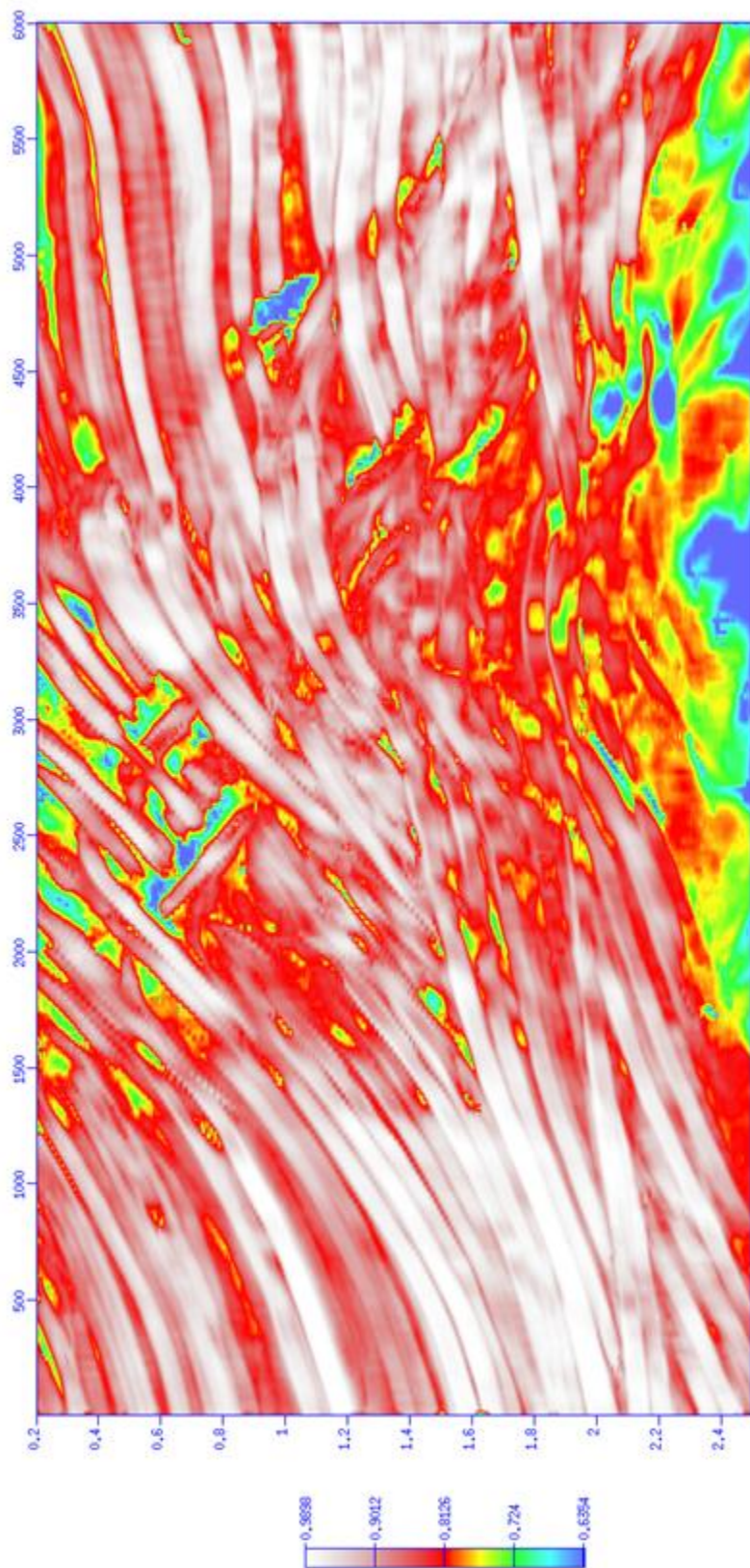


Figura 4.8: Seção coerência do CRS (método de otimização Powell).

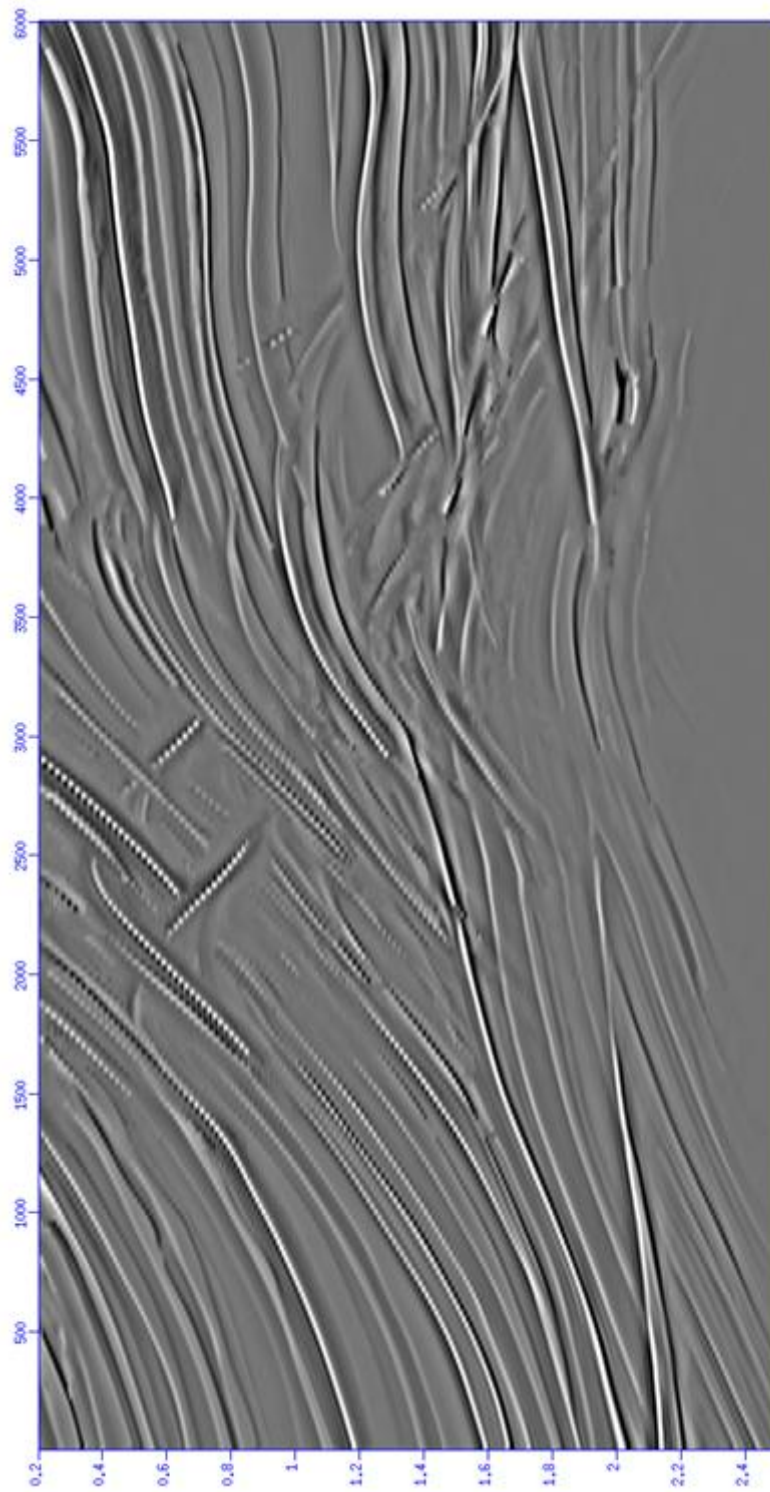


Figura 4.9: Seção CRS empilhada (método de otimização Powell).

### **4.3.2 Empilhamento CRS Utilizando a Metodologia de Otimização Quase-Newton**

Pela da metodologia Quase-Newton, também obtive as seções dos parâmetros cinemáticos do operador CRS (Figuras 4.10, 4.11 e 4.12), da mesma forma que a seção semblance (Figura 4.13) e a empilhada (Figura 4.14).

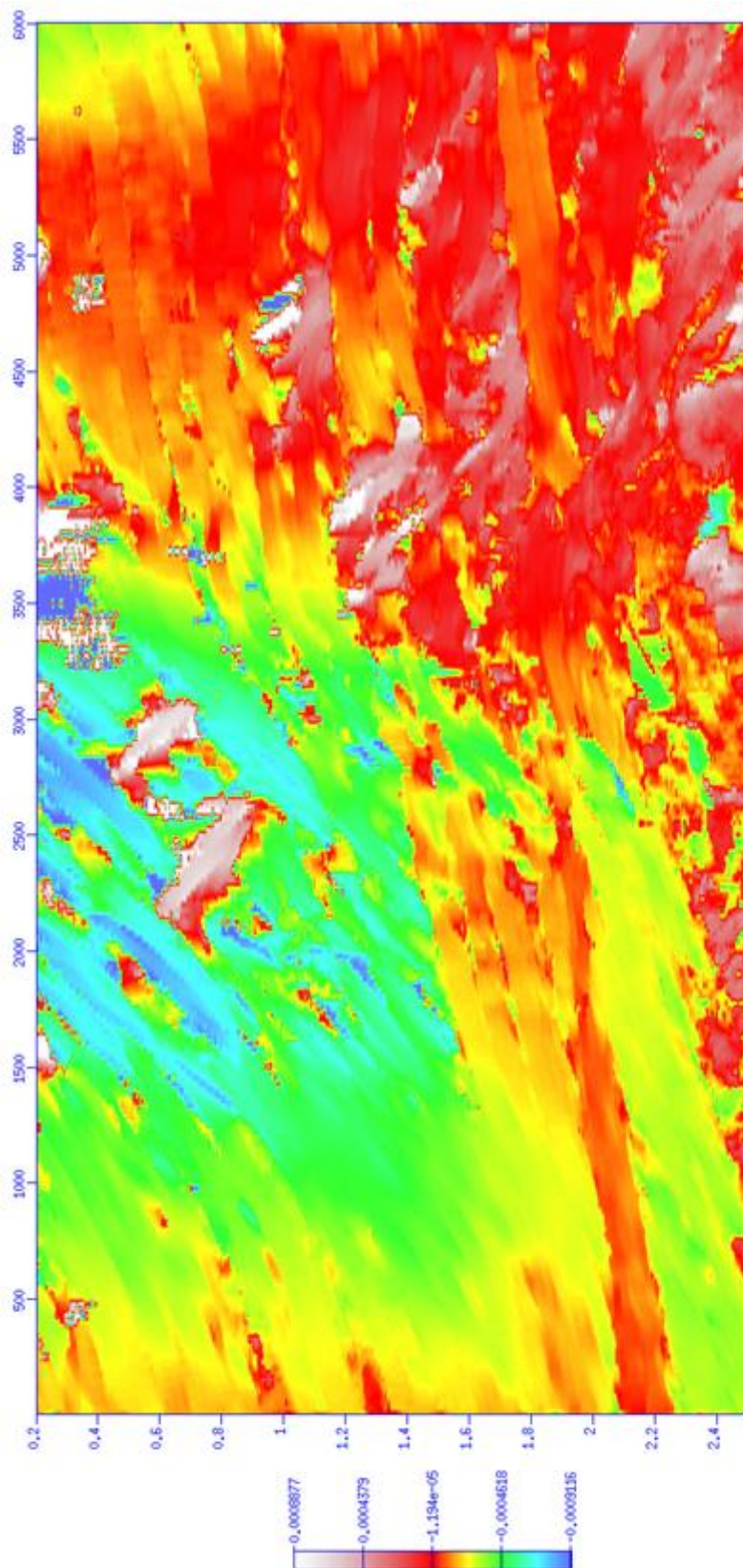


Figura 4.10: Seção CRS do ângulo de emergência (método de otimização Quase-Newton).

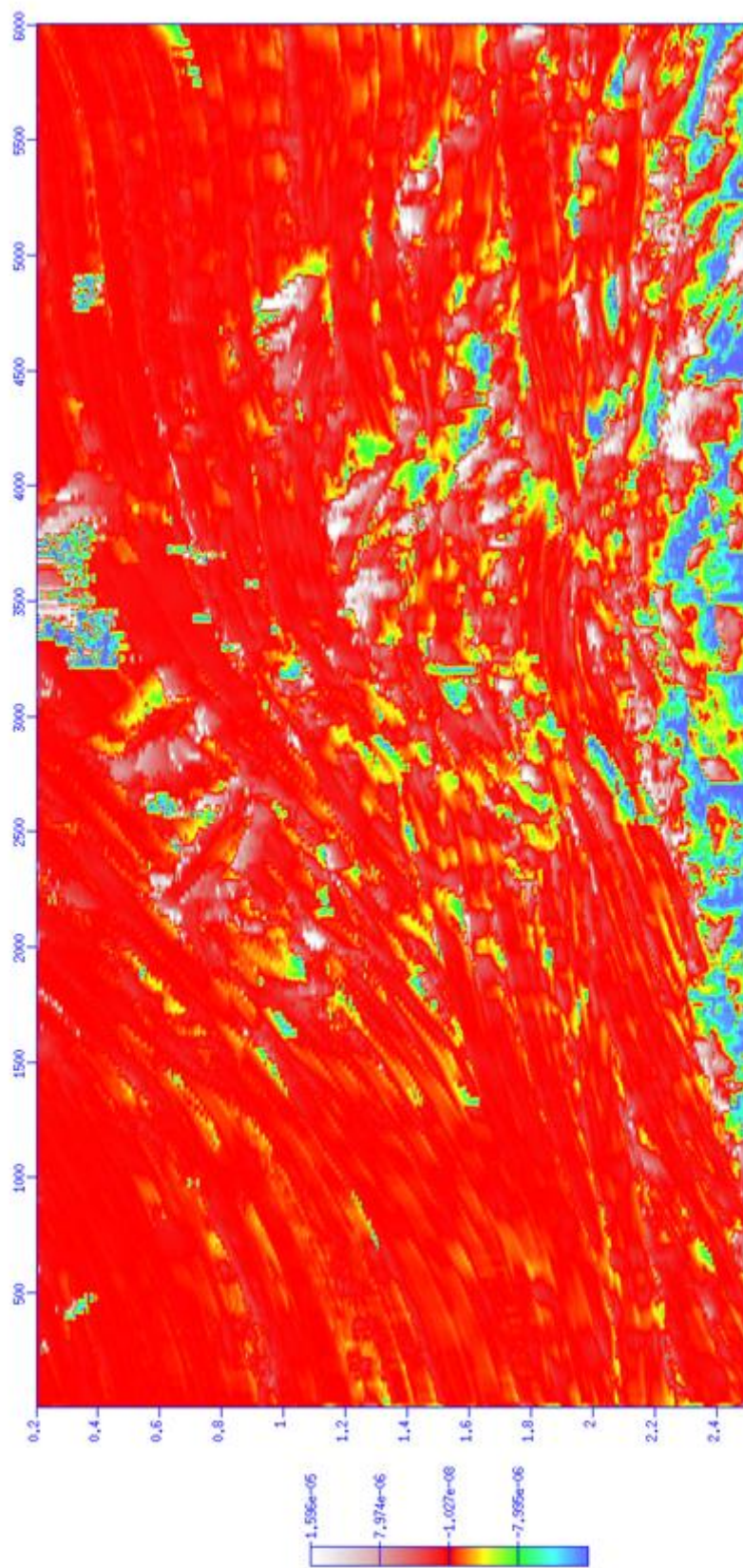


Figura 4.11: Seção CRS do raio de curvatura da onda NIP (método de otimização Quase-Newton).

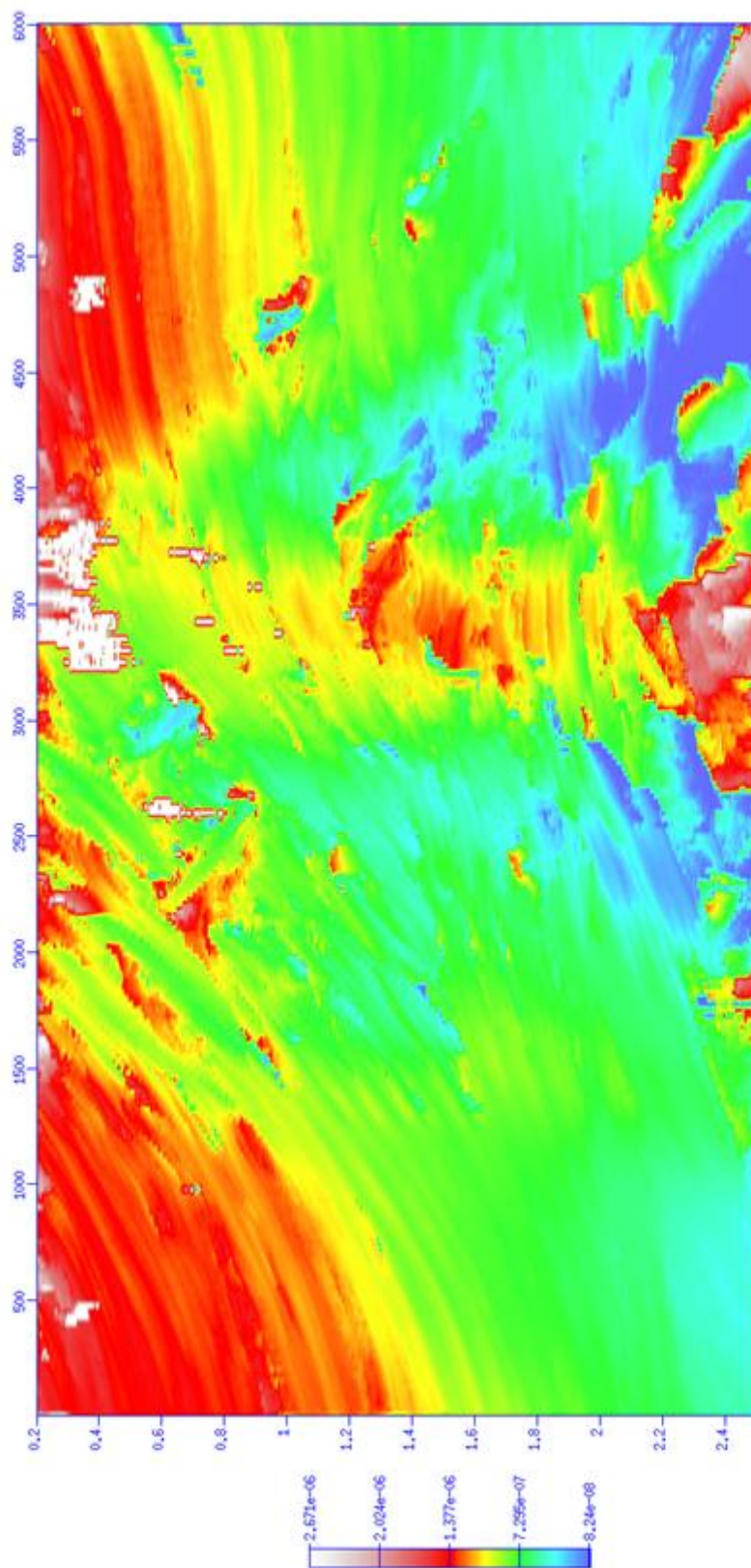


Figura 4.12: Seção CRS do raio de curvatura da onda N (método de otimização Quase-Newton).

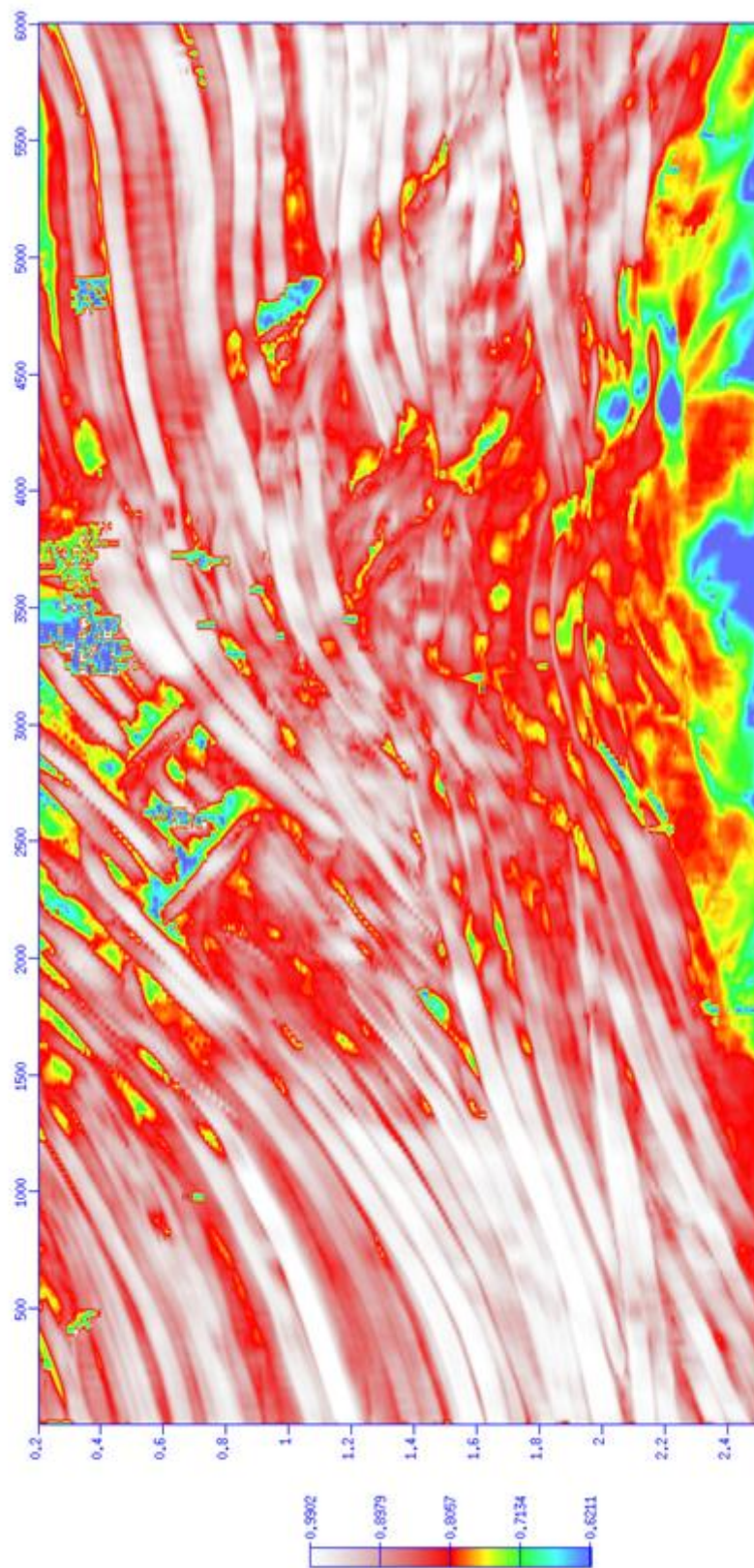


Figura 4.13: Seção coerência do CRS (método de otimização Quase-Newton).

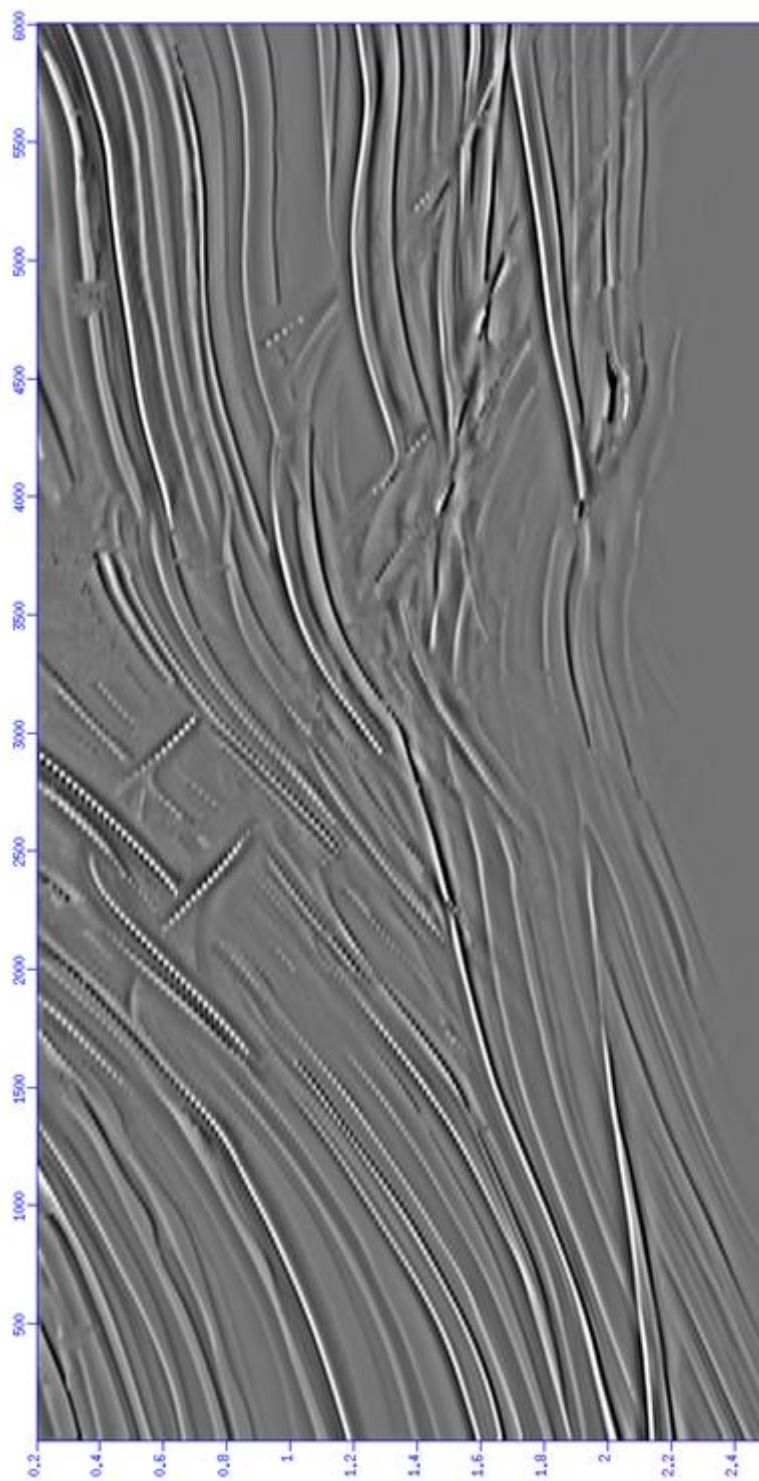


Figura 4.14: Seção CRS empilhada (método de otimização Quase-Newton).

## 4.4 Análise dos Resultados

A primeira avaliação dos resultados diz respeito aos atributos cinemáticos do CRS e as coerências obtidas pelas duas metodologias. É perceptível o melhor desempenho da otimização pelo método de Powell, em relação à metodologia Quase-Newton. Na otimização pelo método Quase-Newton, em todas as seções dos parâmetros de empilhamento do operador CRS e também na seção de coerência houve falhas no processo. Estas falhas ficam evidenciadas pelos valores anômalos que são dados como resultado final (ver Figuras 4.15, 4.16, 4.17 e 4.18). Tal falha pode estar associada ao processo de busca do mínimo global. É provável que o valor escolhido como mínimo global da função-objeto, em realidade seja um mínimo local próximo ao global.

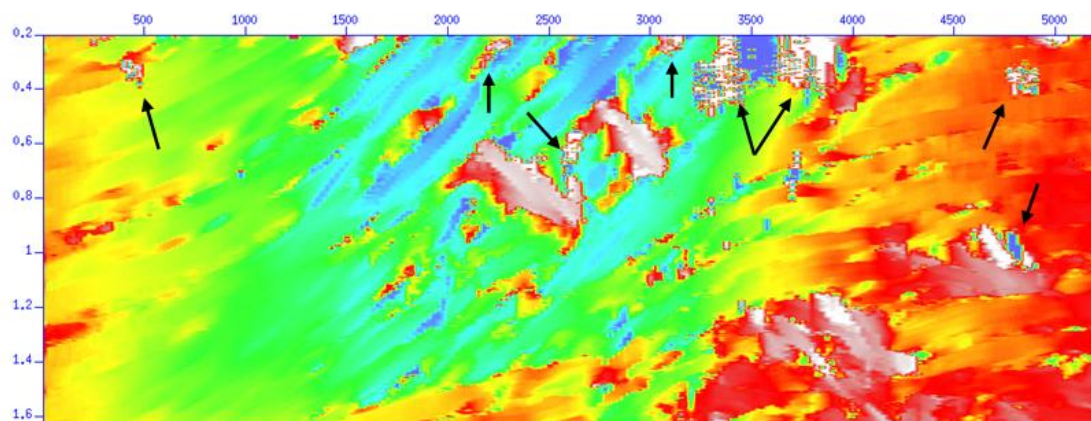


Figura 4.15 : Falhas, indicadas por setas negras, na seção do ângulo de emergência (método de otimização Quase-Newton).

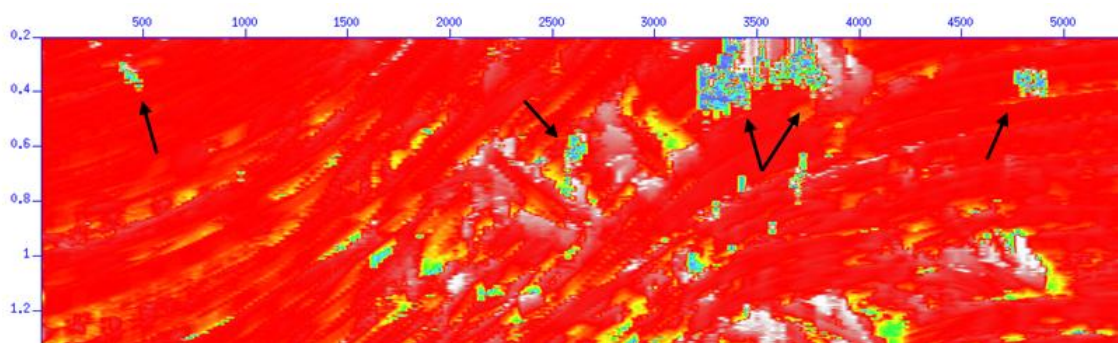


Figura 4.16: Falhas, indicadas por setas negras, na seção do raio de curvatura da onda NIP (método de otimização Quase-Newton).

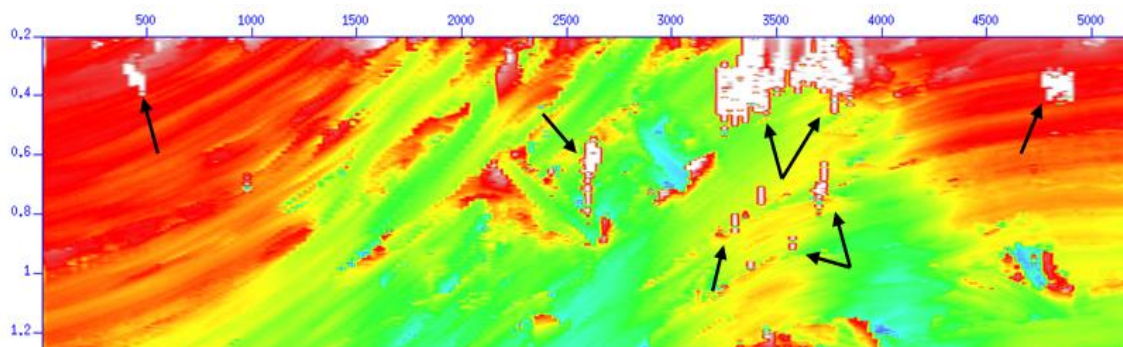


Figura 4.17: Falhas, indicadas por setas negras, na seção do raio de curvatura da onda N (método de otimização Quase-Newton).

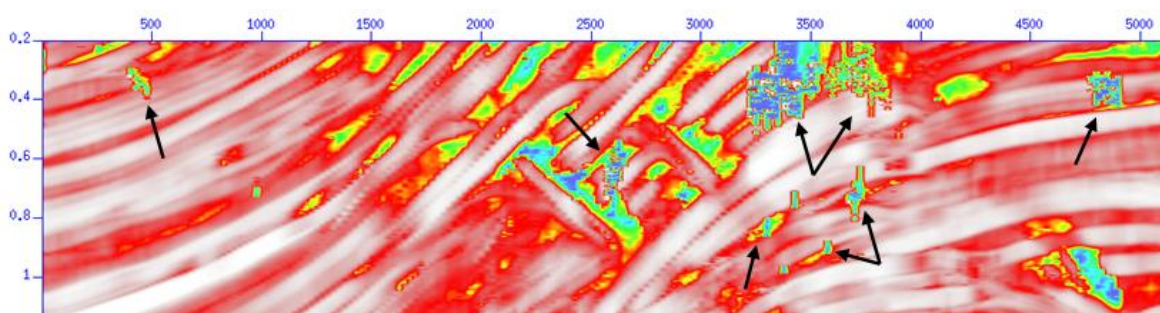
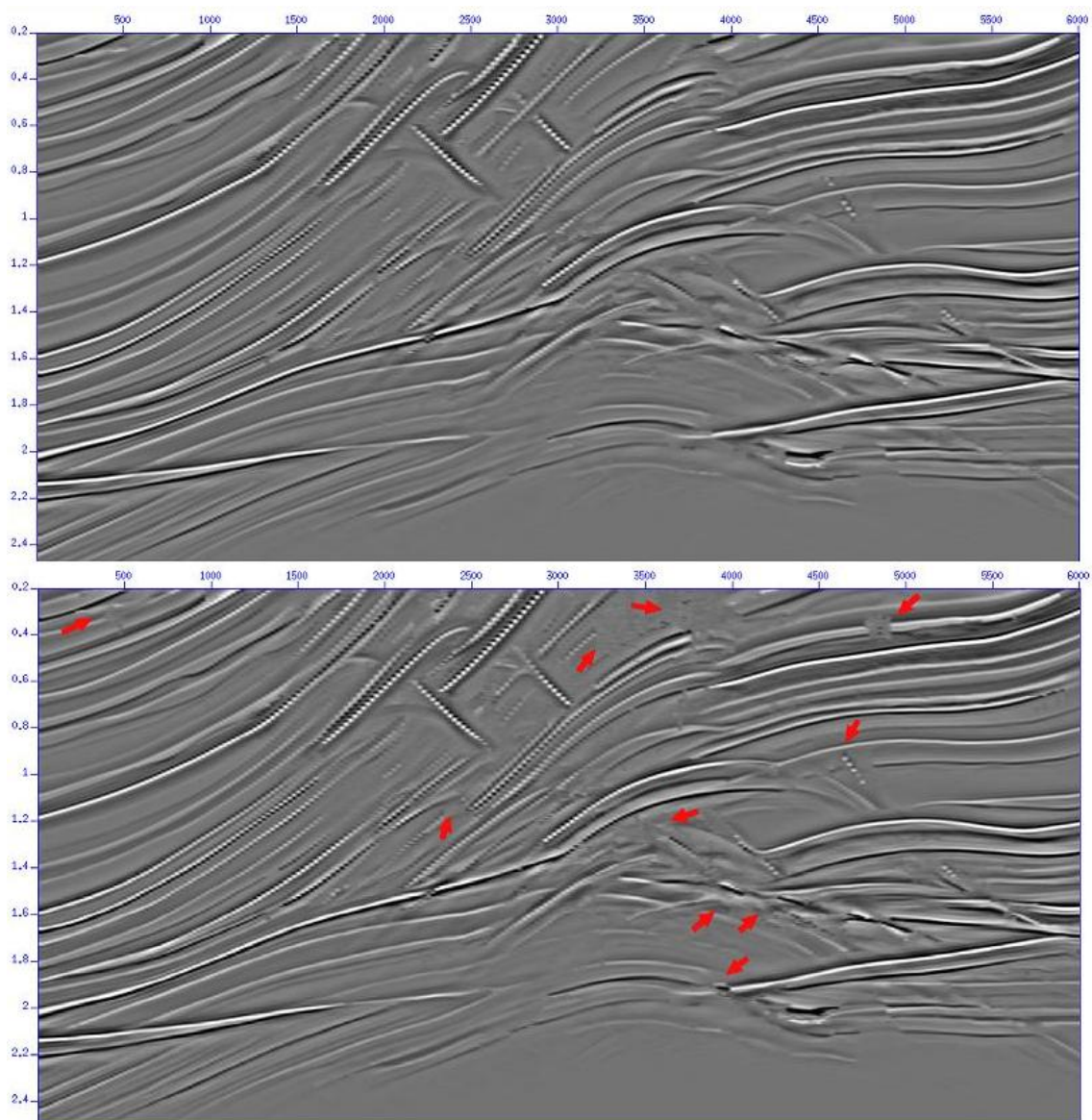


Figura 4.18: Falhas, indicadas por setas negras, na seção de coerência (método de otimização Quase-Newton).

As próximas avaliações a serem feitas são sobre as duas seções empilhadas, estas obtidas pelos métodos de otimização Powell e Quase-Newton (acompanhe Figura 4.19).

A seção superior, obtida pela otimização Powell, seguramente apresenta melhor continuidade dos refletores e aumento na resolução, em relação à seção inferior, obtida pela otimização Quase-Newton (as inferioridades encontradas na seção inferior estão salientadas por setas vermelhas). Estes fatores fomentam, de forma significativa, a demarcação das unidades litoestratigráficas e para a identificação dos truncamentos dos refletores associados às feições estruturais, que são o caso de falhas.



**Figura 4.19:** Seções empilhadas pelo método CRS. A superior, obtida pela otimização Powell, enquanto a inferior, gerada com a otimização Quase-Newton.

## 5. CONCLUSÃO

De forma decisiva, as abordagens de otimização testadas neste trabalho são metodologias de buscas completamente automatizadas, e que findam com bons resultados. Pela característica automatizada destas metodologias, os programas adquirem menor dependência com usuário.

Como reflexo à implementação do CRS 2D, ao invés do empilhamento convencional, existe um incremento do custo computacional, no que tange a simulação da seção empilhada do modelo. No entanto, este acréscimo é completamente aceitável, visando a relação custo benefício da capacidade de processamento dos computadores atuais.

Apesar das seções empilhadas neste trabalho serem representativa e com boa relação sinal-ruído, o ponto forte do empilhamento CRS é a obtenção das seções dos atributos de frentes de ondas hipotéticas que podem ser usados para a determinação do modelo de velocidades (Majer, 2000), análises de amplitude versus afastamento (AVO) e amplitude versus ângulo (AVA) (Biloti et al., 2001), além de outras aplicações.

É válido ressaltar que a metodologia de otimização Powell obteve resultados mais interessantes, mediante a otimização Quase-Newton. Todavia, isso não significa que a otimização Powell é melhor que a Quase-Newton, os resultados apontam para uma melhor adequação da primeira, em relação a segunda metodologia de otimização na resolução deste problema.

Ficou evidente durante a etapa de implementação do programa que as metodologias de otimização não se restringem ao empilhamento CRS, elas são completamente pertinentes à otimização dos parâmetros que definem outras curvas de empilhamento.

## REFERÊNCIAS

BERKOVITCH, A., KEYDAR, S., LANDA, E., TRACHTMAN, P. 1998. **Multifocusing in Practice**. In: ANNUAL INT. MTG., 68. *Expanded abstracts*. Soc. Exp. Geophys.

BILLETTE, F., LE BÉGAT, S., PODVIN, P. LAMBARÉ, G. 2003. Practical aspects and applications of 2D stereotomography. **Geophysics**, 68(3):1008-1021.

BILOTI, R.; PORTUGAL, R.; SANTOS, T. L.; TYGEL, M. 2001. Obtaining AVO and AVA curves from CRS attributes. Submitted to **Journal of Geophysical Exploration**.

BOURGEOIS, A.; BOUGET, M.; LAILLY, P.; POULET, M.; RICARTE, P. & VERSTEEG, R. 1991. Marmousi, Model and Data. In: 52<sup>nd</sup>. EAEG meeting, **Proceedings of the Workshop on Practical Aspects of Seismic Data Inversion**, Copenhagen, p.5:16.

CHIRA OLIVA, P. **Imageamento Multifoco de refletos sísmicos**. 2000. 91f. Tese (Mestrado), Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém. 2000.

COSTA, J. C., DA SILVA, F. C., GOMES, E. N. S., SCHLEICHER, J., MELO, L. A. V., AMAZONAS, D. 2008. Regularization in slope tomography. **Geophysics**, 73(5):VE39-VE47.

De BAZELAIRE, E. 1988. Kinematic normal moveout revisited- Inhomogeneous media and curved interfaces. **Geophysics**, 53, 143-157.

DEREGOWSKI, S. M. & ROCCA, F. 1981. Geometrical optics and wave theory of Constant offset sections in layered media. **Geophysical Prospecting**, 29: 374-406.

GARABITO CALLAPINO, G. **Empilhamento sísmico por superfície de reflexão comum: um novo algoritmo usando otimização global e local**. 2001. 65f. Tese (Doutorado em Geofísica) Universidade Federal do Pará, Centro de Geociências, Belém, 2001.

GELCHISNKY, B.; BERKOVITCH, A.; KEYDAR, S. 1997. **Multifocusing homeomorphic imaging**: Parts 1 and 2, Presented at the Special Course on Homeomorphic Imaging. Seeheim, Germany.

HERTWECK T., SCHLEICHER J., MANN J. 2007. Data stacking beyond CMP. *Leading Edge*, 26(7):818-827.

HUBRAL, P. Computing true amplitude reflections in a laterally inhomogeneous earth. *Geophysics*, v.48, p.1051-1062. 1983

HUBRAL, P. & KREY, T. **Interval velocities from seismic reflection time measurements**. (Monograph), Houston: SEG Publishing. 1980.

JÄGER, R. **The common reflection surface stack: introduction and application**. Universidade de Karlsruhe (Alemanha), (Master's dissertation), 1999.

LEVIN, F. K. 1971. Apparent velocity from dipping interface reflections. *Geophysics*, 36: 510-516.

MARJER, P. 2000. **Inversion of seismic parameters: Determination of the 2D iso-velocity layer model**. Karlsruhe – Germany, Karlsruhe University. Geophysical Institute, 68p. Thesis (Master in Geophysics) – Geophysical Institute, Karlsruhe University.

MINOUX, M. 1983. *Programmation mathématique*: Dunod, Paris.

MÜLLER, T. **The common reflection surface stack: seismic imaging without explicit knowledge of the velocity model**. Der Andere Verlag. Bad Iburg. 1999.

NEIDELL, N. & TANER, M. 1971. Semblance and other coherency measures for multichannel data. *Geophysics*, 36, 468-497.

NOCEDAL J. 1980. Updating Quase-Newton matrices with limited storage. *Mathematics of computation*, 35(151):773-782

PRESS, W. H. et al. **Numerical recipes in fortran 77: the art of scientific computing**. V1. New York: Cambridge University Press, 1997

POWELL, M. J. D. 1964. An efficient method for finding the minimum of a function of several variables without calculating derivatives. **The computer journal**, 7(2): 155-162

SCHLEICHER, T.; TYGEL, M.; HUBRAL, P. 1993. Parabolic and hyperbolic paraxial two-point traveltimes in 3D media. **Geophysical Prospecting**, 41(4): 495-514.

TANER, M. T. & KOEHLER, F. 1969. Velocity spectra-digital computer derivation and applications of velocity functions. **Geophysics**, 34: 859-881.

THORE, P. D.; et al. **Three parameter equation: An efficient tool to enhance the stack.** *Geophysics*, 59(2): 297-308. 1994.

YILMAZ, O. 2000, **Seismic data analysis**, in Cooper, M. R. and Doherty, S. M., ed., seismic data analysis vol. 1, 01: Soc. of Expl. Geophys., 1000: Society of Exploration Geophysicists.