Universidade de São Paulo
Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas
Departamento de Geofísica

ALLAN SEGOVIA SPADINI

Avaliação do método de deconvolução sobre dados de sísmica rasa

O ORIGINAL ENCONTRA-SE DISPONÍVEL NA UNIDADE

VERSÃO CORRIGIDA

São Paulo

2012

ALLAN SEGOVIA SPADINI

Avaliação do método de deconvolução sobre dados de sísmica rasa

Dissertação apresentada ao Departamento de Geofísica do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciências – Programa Geofísica.

Área de Concentração: Geofísica Aplicada

Orientador(a): Prof.^a Dr.^a Liliana Alcazar Diogo

São Paulo

2012

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Nome: SPADINI, Allan Segovia

Título: Avaliação do método de deconvolução sobre dados de sísmica rasa.

Tese apresentada ao Instituto de Astronomia,
Geofísica e Ciências Atmosféricas da
Universidade de São Paulo para obtenção do
título de Mestre em Ciências – Programa
Geofísica

Aprovado em:

Banca Examinadora:

Prof. Dr.(a)._____ Instituição:_____

Julgamento:_____ Assinatura:_____

Prof. Dr.(a)._____ Instituição:_____

Julgamento:_____ Assinatura:_____

Prof. Dr.(a)._____ Instituição:_____

Julgamento:_____ Assinatura:_____

AGRADECIMENTOS

A minha orientadora Prof.^a Dr.^a Liliana Alcazar Diogo pela dedicação, apoio e por estar sempre disposta a ouvir o que eu tenho a dizer.

Ao Prof. Dr. Renato Luiz Prado por ter cedido o conjunto de tiro de Colônia e pelo apoio, principalmente na disciplina de Sísmica II. E aos alunos de Sísmica II pelas dúvidas estranhas que me ajudaram a aprender melhor o que eu achava que já sabia.

Ao Prof. Dr. Carlos Alberto Mendonça pelas avaliações e observações feitas nos meus relatórios durante o mestrado.

Aos professores Eronaldo, Leila, Yára, Afonso, Wladimir, Éder, Naomi e Porsani por toda a ajuda na graduação e pós-graduação.

Quero agradecer também a minha amiga Luciana Bertolla por todo companheirismo e por estar sempre ao meu lado me apoiando todos os anos de graduação e pós.

Ich möchte meine Freudin Laura Jasmin Fischer danken. Die wenigen Augenblicke die ich an ihrer Seite geblieben waren verrückt und macht Spaß. Ich werde nie vergessen!

Aos amigos Fabio (da Lu), Fabio (da sala da Lu), Thiago (Garrafa), Soraia, Eduardo (Matacão), Renata, Gabriel, Susan, Emerson e Cassiano (Pira).

As secretárias do Departamento de Geofísica do IAG/USP por serem sempre simpáticas.

Aos técnicos Ernande, Marcelo e Marco que sempre foram muito legais.

A minha mãe, sem o apoio dela eu nunca teria chegado até aqui!!! E a todos os meus gatos e cachorros, sempre que estou estressado não conseguindo fazer alguma coisa basta que eu me lembre deles para melhorar.

A Capes pela bolsa de mestrado.

Eu tenho o maior medo desse negócio de ser normal.

John Lennon

RESUMO

SPADINI, A. S. Avaliação do método de deconvolução sobre dados de sísmica rasa. 2012. 104f. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

Neste trabalho de pesquisa foi realizado um estudo do método de deconvolução visando melhor adequação à situação encontrada na escala de investigação rasa para a estimativa da forma de onda e da resposta impulsiva da Terra. Procedimentos determinísticos e estatísticos (métodos cegos) foram avaliados sobre dados sintéticos e dados reais adquiridos com fontes de impacto e com uma fonte pseudo-aleatória. No caso onde o pulso ou a resposta impulsiva são conhecidos, foram estudadas técnicas de regularização e identificação que contornem os problemas como a instabilidade provocada pela presença de ruído e a presença de lóbulos laterais junto aos impulsos do traço. Já no caso onde apenas o traço sísmico é conhecido, foram estudadas técnicas que não requerem as premissas usuais, como fase mínima para o pulso e aleatoriedade para a resposta impulsiva. Para a deconvolução determinística, tanto nos resultados para os dados sintéticos quanto nos dados reais foi percebido uma superioridade do método de regularização de Cauchy, sendo ideal para a aplicação em conjunto com métodos que forneçam uma boa estimativa do pulso. Quanto à utilização dos métodos cegos, em geral foram observados bons resultados na compactação dos pulsos, mas a utilização destes métodos possui limitações quanto à preservação das amplitudes do sinal, nível de ruído e distorções da forma de onda. Os testes realizados neste trabalho apontam que para alcançar melhores resultados na deconvolução em dados reais na escala de investigação rasa se faz necessário aprimorar ou investigar outras estratégias para a estimativa da forma de onda.

Palavras Chave: Sísmica rasa. Deconvolução. Processamento de Sinais.

ABSTRACT

SPADINI, A. S. Evaluation of the deconvolution method on shallow seismic data. 2012. 104f. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

In this research work a study of the method of deconvolution was conducted in order to improve the adequacy to the shallow subsurface scale of investigation to the estimate of the seismic wavelet and of the earth impulse response. Deterministic and statistical (blind) procedures were evaluated over synthetic and real data acquired with impact sources and a pseudo-random source. In the case where the pulse or the earth impulse response are known, an evaluation of techniques of regularization and identification that avoid problems such as the instability caused by the presence of noise and the presence of lateral lobes along with the impulses of the trace was done. In the case where only the seismic trace is known, were studied techniques that don't require usual assumptions, as minimum phase to the pulse or randomness to the impulse response. To the deterministic deconvolution, the results for both synthetic and real data was perceived superiority of the method of regularization of Cauchy, making it ideal for the application in conjunction with methods that provide a good estimate of the pulse. The use of blind methods, in general returns good results in the compression of pulses, but the use of this methods has limitations as to the preservation of the signal amplitudes, level of noise and distortions of the wavelet. Thus, the present results indicate that to achieve better results in the deconvolution for real data in the shallow subsurface scale it's necessary to improve or investigate other strategies to the estimation of the seismic wavelet.

Keywords: Shallow subsurface seismic. Deconvolution. Signal Processing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2. 1 Exemplo de forma de onda filtrada, utilizando o pré-branqueamento como regularização.	23
Figura 2. 2: Modelo esquemático da rede neural de Hopfield, adaptado de Wang e Mendel (1992). ..	29
Figura 3. 1: Comportamento das medidas de H e H' para diferentes distribuições de probabilidade, adaptado de De Vries (1984).	33
Figura 3. 2: Cepstros complexos: de uma wavelet (a); resposta impulsiva (b); traço sísmico sem ruído (c); traço sísmico com ruído (d).	41
Figura 4. 1: Formas de onda utilizadas na construção dos traços sintéticos avaliados e seus respectivos zeros em termos da transformada Z.	47
Figura 4. 2: Exemplo de traço sintético utilizado nos testes de estimativa da forma de onda.	48
Figura 4. 3: Estimativa do pulso por mínimos quadrados realizada 100 vezes com diferentes ruídos gaussianos aleatórios de mesmo nível, regularizada com a matriz identidade.	49
Figura 4. 4: Estimativa do pulso por mínimos quadrados realizada 100 vezes com diferentes ruídos gaussianos aleatórios de mesmo nível, regularizada com a matriz (2.11).	50
Figura 4. 5: Resultado da compressão dos pulsos de fase mínima, mista e máxima pelos diferentes métodos de deconvolução estudados.	51
Figura 4. 6: Resposta impulsiva obtida com os métodos Cauchy, Gold e redes neurais para o sismograma sintético construído com a forma de onda de fase mínima, sendo os pontos em vermelho a resposta desejada e linha em azul a resposta estimada.	52
Figura 4. 7: Resposta impulsiva obtida com os métodos Cauchy, Gold e redes neurais para o sismograma sintético construído com a forma de onda de fase mista, sendo os pontos em vermelho a resposta desejada e linha em azul a resposta estimada.	53
Figura 4. 8: Resposta impulsiva obtida com os métodos Cauchy, Gold e redes neurais para o sismograma sintético construído com a forma de onda de fase máxima, sendo os pontos em vermelho a resposta desejada e linha em azul a resposta estimada.	54
Figura 4. 9: Resposta impulsiva, forma de onda e traço sintético construído com os dois anteriores após a adição de ruído, na colunada direita são mostrados seus respectivos espectros de amplitude...	56
Figura 4. 10: Resultado da deconvolução por mínima entropia e espectro de amplitude do resultado utilizando o kurtosis como norma.	57
Figura 4. 11: Resultado da deconvolução por mínima entropia e espectro de amplitude do resultado utilizando a norma logarítmica.	58
Figura 4. 12: Resultado da deconvolução por mínima entropia com restrições no domínio da frequência com o pulso de fase mínima da figura 4.1.	58
Figura 4. 13: Resultado da deconvolução por mínima entropia com restrições no domínio da frequência com o pulso de fase mista da figura 4.1.	59
Figura 4. 14: Resultado da deconvolução por mínima entropia com restrições no domínio da frequência com o pulso de fase máxima da figura 4.1.	60
Figura 4. 15: Exemplo de aplicação do algoritmo de rotação do traço sísmico visando o aumento do kurtosis do traço, (a) mostra o traço antes da aplicação do algoritmo e (b) após a aplicação.	61

Figura 4. 16: Exemplo da aplicação da rotação do traço sísmico com a maximização do kurtosis, para 10 traços com formas de onda de diferentes fases, com o sismograma original antes da aplicação e após a aplicação do algoritmo.	62
Figura 4. 17: Resposta impulsiva gerada para testes sintéticos e resultado da sua convolução com o pulso de fase máxima da figura 4.1.....	63
Figura 4. 18: Estimativa do pulso presente em um conjunto CMP formado pela convolução da resposta impulsiva da figura 4.17 com pulsos de diferentes fases. Os itens (a), (b) e (c) representam as estimativas para os casos de fase mínima, mista e máxima respectivamente.	64
Figura 4. 19: Estimativa da forma de onda de fase mínima (a) e mista (b) contidas em dois traços diferentes com mesma resposta impulsiva.	65
Figura 4. 20: Valor das normas kurtosis (a) e norma logarítmica (b) para o traço deconvolvido pela deconvolução regularizada por Cauchy com o pulso estimado para o primeiro traço.	66
Figura 4. 21: Resultado da deconvolução do traço da deconvolução regularizada por Cauchy pelo pulso estimado pelo método de relação cruzada.	66
Figura 4. 22: Zeros da wavelet de fase mínima da figura (4.1) (pulso 1); e zeros desta mesma wavelet após a aplicação de um filtro (pulso 2).	67
Figura 4. 23: Estimativa da forma de onda de fase mínima (a) e mista (b) contidas em dois traços diferentes com mesma resposta impulsiva.	68

Figura 5. 1: Traço piloto obtido através da autocorrelação do sinal medido por um geofone próximo a fonte, as linhas pretas delimitam o pulso utilizado como entrada nos algoritmos de deconvolução. ...	70
Figura 5. 2: Conjunto de tiro adquirido com a técnica Mini-Sosie (a) e o intervalo delimitado para utilização nos algoritmos de deconvolução (b), onde o traço 1 equivale ao afastamento 40 metros.	70
Figura 5. 3: Resultado da deconvolução com o algoritmo deconvolução regularizado por Cauchy (a) e o resultado da convolução de (a) com o pulso medido (figura 5.1) (b).....	71
Figura 5. 4: Resultado da deconvolução com o algoritmo de deconvolução de Gold (a) e o resultado da convolução de (a) com o pulso medido (figura 5.1) (b).	72
Figura 5. 5: Resultado da deconvolução com o algoritmo deconvolução por redes neurais (a) e o resultado da convolução de (a) com o pulso medido (figura 5.1) (b).....	72
Figura 5. 6: Resultado da estimativa do pulso de cada traço utilizando a resposta impulsiva estimada por Cauchy (a) e resultado da convolução entre a resposta impulsiva e os pulsos estimados (b).	74
Figura 5. 7: Resultado da estimativa do pulso de cada traço utilizando a resposta impulsiva estimada pela deconvolução de Gold (a) e resultado da convolução entre a resposta impulsiva e os pulsos estimados (b).	74
Figura 5. 8: Resultado da estimativa do pulso de cada traço utilizando a resposta impulsiva estimada pelas redes neurais (a) e resultado da convolução entre a resposta impulsiva e os pulsos estimados (b).	75
Figura 5. 9: Correlação entre o sismograma original e os sismogramas estimados pela: convolução da resposta obtida com o algoritmo de deconvolução regularizado por Cauchy com a forma de onda obtida da autocorrelação do traço piloto (pontos em azul); e convolução entre a resposta impulsiva estimada por Cauchy e o pulso estimado utilizando como base a mesma resposta impulsiva (pontos em vermelho).	75
Figura 5. 10: Correlação entre o sismograma original e o sismograma estimado pela convolução da resposta obtida com o algoritmo de deconvolução regularizado por Cauchy com o traço piloto.	76
Figura 5. 11: Correlação entre o sismograma original e os sismogramas estimados pela: convolução da resposta obtida com o algoritmo de deconvolução regularizado por Gold com a forma de onda obtida da autocorrelação do traço piloto (pontos em azul); e convolução entre a resposta impulsiva estimada	

por Gold e o pulso estimado utilizando como base a mesma resposta impulsiva (pontos em vermelho).	77
Figura 5. 12: Correlação entre o sismograma original e os sismogramas estimados pela: convolução da resposta obtida com o algoritmo de deconvolução regularizado por redes neurais com a forma de onda obtida da autocorrelação do traço piloto (pontos em azul); e convolução entre a resposta impulsiva estimada por redes neurais e o pulso estimado utilizando como base a mesma resposta impulsiva (pontos em vermelho).	77
Figura 5. 13: Traço piloto obtido através da autocorrelação do sinal medido por geofone próximo a fonte, para o conjunto de tiro de Colônia.	78
Figura 5. 14: Conjunto de tiro de Colônia adquirido com a técnica Mini-Sosie (a); e resultado da sua deconvolução pelos métodos de: Cauchy (b); Gold (c); e redes neurais (d).	79
Figura 5. 15: Traços piloto referentes a cada tiro presente no conjunto CMP (b).	80
Figura 5. 16: Conjunto CMP adquirido com a técnica Mini-Sosie no terreno do IF-USP (a); e resultado da sua deconvolução pelos métodos de: Cauchy (b); Gold (c); e redes neurais (d).	81
Figura 5. 17: Pannel semblance: do sismograma (a); da resposta impulsiva obtida por Cauchy (b); da resposta impulsiva obtida por Gold (c); da resposta impulsiva obtida por redes neurais (d).	82
Figura 5. 18: Seção empilhada, dos dados CMP adquiridos no terreno do IF-USP.	83
Figura 5. 19: Resultado da deconvolução da deconvolução pelo método de Cauchy da seção empilhada (figura 5.18).	83
Figura 5. 20: Conjunto de tiro obtido com a técnica Mini-Sosie com um compactador de solo na praça do relógio da USP (a) e a resposta impulsiva estimada pela deconvolução por mínima entropia com restrições na frequência.	84
Figura 5. 21: Conjunto de tiro obtido com a fonte rifle solo na praça do relógio da USP (a) e a resposta impulsiva estimada pela deconvolução por mínima entropia com restrições na frequência (b).	85
Figura 5. 22: Conjunto de tiro obtido com a fonte marreta na praça do relógio da USP (a) e a resposta impulsiva estimada pela deconvolução por mínima entropia com restrições na frequência (b).	85
Figura 5. 23: Resultado da deconvolução do conjunto de tiro de Colônia (sismograma original na figura 5.14 (a)); pelo algoritmo de deconvolução por mínima entropia com restrições na frequência: primeira etapa (a) e segunda etapa (b).	86
Figura 5. 24: Espectros de amplitude: sismograma original (a); após a aplicação da primeira etapa da deconvolução por mínima entropia com restrições na frequência (b); após a aplicação da segunda etapa (c).	87
Figura 5. 25: Conjunto CMP obtido com a técnica Mini-Sosie (a) e a resposta impulsiva estimada pela deconvolução por mínima entropia com restrições na frequência (b).	88
Figura 5. 26: Pannel semblance dos conjuntos CMP da figura 5.25.	88
Figura 5. 27: Resultado da deconvolução pelo método de deconvolução por mínima entropia com restrições na frequência da seção empilhada da figura 5.18.	89
Figura 5. 28: Dados da figura 5.18 rotacionados pelo método de rotação por fase constante.	90
Figura 5. 29: Máximos: do envelope do sismograma original (linha azul); do sismograma original (linha verde); e do sismograma rotacionado (pontos em vermelho).	90
Figura 5. 30: Resultado da estimativa do pulso no conjunto de tiro adquirido com a técnica Mini-Sosie na praça do relógio da USP pelo método homomórfico (a); e resultado da sua aplicação na deconvolução deste conjunto de tiro pelo método de Cauchy (b).	91
Figura 5. 31: Resultado da estimativa do pulso no conjunto de tiro adquirido com um rifle na praça do relógio da USP pelo método homomórfico (a); e resultado da sua aplicação na deconvolução deste conjunto de tiro pelo método de Cauchy (b).	92

Figura 5. 32: Resultado da estimativa do pulso no conjunto de tiro adquirido com uma marreta na praça do relógio da USP pelo método homomórfico (a); e resultado da sua aplicação na deconvolução deste conjunto de tiro pelo método de Cauchy (b).	92
Figura 5. 33: Resultado da estimativa do pulso no conjunto de tiro adquirido com a técnica Mini-Sosie em Colônia pelo método homomórfico (a); e resultado da sua aplicação na deconvolução deste conjunto de tiro pelo método de Cauchy (b).	93
Figura 5. 34: Resultado da deconvolução da seção (figura 5.18), com as wavelets estimadas através dos seus respectivos conjuntos CMP.	94
Figura 5. 35: Resultado da deconvolução da seção (figura 5.18), com o pulso estimado para toda a seção.	94
Figura 5. 36: Resultado da deconvolução da seção empilhada após a rotação, com o pulso estimado para toda a seção.	95
Figura 5. 37: Pulso representativo dos estimados no conjunto de tiro adquirido com a técnica Mini-Sosie na praça do relógio da USP pelo de relação cruzada (a); e resultado da sua aplicação na deconvolução deste conjunto de tiro pelo método de Cauchy (b).	96
Figura 5. 38: Pulso representativo dos estimados no conjunto de tiro adquirido com um rifle na praça do relógio da USP pelo de relação cruzada (a); e resultado da sua aplicação na deconvolução deste conjunto de tiro pelo método de Cauchy (b).	96
Figura 5. 39: Pulso representativo dos estimados no conjunto de tiro adquirido com uma marreta na praça do relógio da USP pelo de relação cruzada (a); e resultado da sua aplicação na deconvolução deste conjunto de tiro pelo método de Cauchy (b).	97
Figura 5. 40: Resultado da estimativa do pulso no conjunto de tiro adquirido com a técnica Mini-Sosie em Colônia pelo método de relação cruzada (a); e resultado da sua aplicação na deconvolução deste conjunto de tiro pelo método de Cauchy (b).	98
Figura 5. 41: Resultado da deconvolução da seção (figura 5.18), com as wavelets estimadas para os seus traços pelo método de relação cruzada.	99

LISTA DE TABELAS

Tabela 3. 1: Norma V e saída desejada bi. (a) Kurtosis e (b) norma (3.6) normalizada.	36
--	----

SUMÁRIO

RESUMO	8
ABSTRACT	9
LISTA DE FIGURAS	10
LISTA DE TABELAS	14
1 INTRODUÇÃO	17
2 CASO DETERMINÍSTICO	20
2.1 EXTRAÇÃO DO PULSO	20
2.1.1 ESTIMATIVA POR MÍNIMOS QUADRADOS	20
2.2 DECONVOLUÇÃO DETERMINÍSTICA	22
2.2.1 DECONVOLUÇÃO REGULARIZADA POR CAUCHY	23
2.2.2 DECONVOLUÇÃO DE GOLD	26
2.2.3 DECONVOLUÇÃO POR REDES NEURAIS DE HOPFIELD	29
3 CASO CEGO	32
3.1 DECONVOLUÇÃO POR MÍNIMA ENTROPIA COM RESTRIÇÕES NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA	32
3.1.1 ENTROPIA	32
3.1.2 DECONVOLUÇÃO POR MÍNIMA ENTROPIA (MED)	34
3.1.3 RESTRIÇÕES NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA	36
3.2 ROTAÇÃO POR FASE CONSTANTE	39
3.3 ESTIMATIVA HOMOMÓRFICA	39
3.4 MÉTODO DE IDENTIFICAÇÃO POR RELAÇÃO CRUZADA.....	42
3.4.1 IDENTIFICAÇÃO DE CANAIS NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA	43
4 TESTES SINTÉTICOS	47
4.1 CASO DETERMINÍSTICO	48
4.1.1 EXTRAÇÃO DO PULSO SÍSMICO.....	48
4.1.2 DECONVOLUÇÃO DETERMINÍSTICA	50
4.2 CASO CEGO.....	55
4.2.1 DECONVOLUÇÃO POR MÍNIMA ENTROPIA COM RESTRIÇÕES NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA	55
4.2.2 ROTAÇÃO POR FASE CONSTANTE	60
4.2.3 ESTIMATIVA HOMOMÓRFICA	62
4.2.4 IDENTIFICAÇÃO POR RELAÇÃO CRUZADA	65
5 APLICAÇÃO A DADOS REAIS	69

5.1 DECONVOLUÇÃO DETERMINÍSTICA	69
5.2 CASO CEGO.....	84
5.2.1 DECONVOLUÇÃO POR MÍNIMA ENTROPIA COM RESTRIÇÕES NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA	84
5.2.2 ROTAÇÃO POR FASE CONSTANTE	89
5.2.3 ESTIMATIVA HOMOMÓRFICA	91
5.2.4 ESTIMATIVA POR RELAÇÃO CRUZADA.....	95
6 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	100
7 CONCLUSÃO.....	102
REFERÊNCIAS	104

1 INTRODUÇÃO

O principal objetivo da deconvolução é o aumento da resolução temporal do sismograma. Este procedimento pode ser dividido em duas categorias principais, a deconvolução determinística e a deconvolução cega ou estatística. A deconvolução determinística é utilizada quando existe uma medida ou estimativa da forma de onda restando apenas à tarefa de remoção do efeito desta no traço sísmico. Neste tópico também se enquadra a extração da forma de onda do traço sísmico quando a resposta impulsiva é estimada por informações obtidas através de perfilagem, por exemplo. Já a deconvolução cega trata do caso onde apenas o traço sísmico é conhecido e a forma de onda e/ou resposta impulsiva são desejados, tornando necessária a adoção de restrições mais fortes quanto às características do traço sísmico para que uma resposta possa ser alcançada.

Na sísmica rasa tanto o caso determinístico quanto o caso cego são possíveis. No caso determinístico têm-se o exemplo da técnica Mini-Sosie (BARBIER et al. 1976), onde o sinal é medido próximo à fonte tornando possível estimar a forma de onda contida no traço. Além do exemplo citado, a aplicação da deconvolução determinística também é interessante na organização de algoritmos iterativos para refinamento da estimativa da resposta impulsiva e/ou da forma de onda. Já o caso cego é o mais comumente encontrado, já que a forma de onda é difícil de ser medida e pode sofrer mudança de fase no seu percurso até o geofone.

Em sísmica rasa, tanto no caso cego quanto no determinístico, são encontradas características diferenciadas da sísmica de petróleo. Sendo que a maior parte das metodologias de processamento utiliza aproximações válidas apenas para a escala encontrada na exploração de petróleo, para a qual, a deconvolução usualmente é realizada por métodos que consideram uma resposta impulsiva da terra com distribuição aleatória (branca) e/ou fase mínima para o pulso sísmico (*wavelet*), sendo aceito que a violação destas premissas leva a resíduos indesejáveis no traço sísmico. Na sísmica rasa a resposta impulsiva apresenta um pequeno número de reflexões levando a um espectro com um desvio da aleatoriedade ainda maior do que a deficiência nas baixas frequências observada em sísmica profunda por Saggaf e Robinson (2000). Além disso, as formas de onda encontradas nos sismogramas geralmente apresentam mudanças de fase e amplitude com o afastamento fonte receptor, como apontado em Pullan e Hunter (1995), Diogo, Diagon e Prado (2004) e Diogo (2004), já que nesta escala é necessária a utilização de afastamentos longos em relação à profundidade.

Considerando estas características, na deconvolução determinística é interessante estudar metodologias que considerem um número finito de formas de ondas sobrepostas no traço. Nos trabalhos de Sacchi (1997) e de Dondurur (2010) foram avaliadas técnicas de regularização que utilizam esta característica. Além destes trabalhos existe também o método de deconvolução através de redes neurais proposto em Wang e Mendel (1992), este promove grande compactação das formas de onda presentes no traço.

A deconvolução cega é mais complexa e é amplamente estudada em diversas áreas, não apenas em geofísica. Pelos motivos citados, é interessante estudar o problema de deconvolução na sísmica rasa como um problema que considere que o pulso sísmico pode possuir qualquer fase e que a resposta impulsiva não sofre grandes restrições quanto a sua distribuição. Em conjunto com o algoritmo de deconvolução de Wiener, um dos mais populares, é utilizada a autocorrelação do traço sísmico como uma forma de estimativa da forma de onda contida no traço. Entretanto, a autocorrelação é uma medida estatística de segunda ordem e não guarda informação sobre a fase do pulso. Para uma estimativa da fase devem ser utilizadas medidas estatísticas de ordem superior.

Com o intuito de contornar este problema Wiggins (1978) desenvolveu uma metodologia de deconvolução por mínima entropia (MED) baseada numa medida de “simplicidade” do traço, considerando apenas uma resposta impulsiva de distribuição não gaussiana. O algoritmo foi seguido de algumas variações, mas deixou de ser utilizado devido ao reconhecimento da instabilidade deste tipo de técnica para dados com espectro muito limitado e devido à perda dos refletores mais fracos. A metodologia foi retomada posteriormente por diversos autores, incluindo Sacchi, Velis e Comínguez (1994) e Van der Baan (2008) na tentativa de contornar este problema.

Outra metodologia importante foi a de deconvolução homomórfica. Os sistemas homomórficos, originalmente propostos por Oppenheim (1965a) e (1965b), utilizam o fato de que a convolução entre dois sinais pode ser expressa no domínio do cepstro complexo como uma soma e, além disso, neste domínio os sinais podem ser visualmente separados. Esta metodologia já foi aplicada em dados sísmicos por Ulrych (1971), Otis e Smith (1977), Gomes (1998) dentre outros. Entretanto existem problemas de separação dos sinais na presença de ruído e para as diferentes fases dos sinais.

Como uma alternativa à utilização de algoritmos que fazem uso de estatística de ordem superior, Gardner (1991) mostrou a possibilidade de extração de informação sobre a fase utilizando informações de estatística de segunda ordem em sinais cicloestacionários.

Este tipo de técnica foi então aplicada por Luo e Li (1998) que mostraram uma forma adequada de utilização desta informação para o caso de deconvolução sísmica.

Como relatado acima, a sísmica rasa possui características diferenciadas da sísmica profunda e existe uma série de algoritmos que podem apresentar características mais adequadas a este caso. Com isto, esta pesquisa teve como objetivo examinar a utilização de métodos de deconvolução sobre dados adquiridos em sísmica rasa. Foram analisados o caso determinístico e o cego. Para que o exposto acima possa ser mais bem explicado esta dissertação foi dividida como segue:

No capítulo 2 é apresentado o caso de deconvolução determinística. Como introdução ao capítulo, foi estudada a extração da forma de onda do traço sísmico quando a resposta impulsiva é conhecida. Neste caso, a extração foi focada no método de mínimos quadrados e formas de regularização do problema. Para a deconvolução determinística, foi dada ênfase aos métodos que buscam uma resposta esparsa para a resposta impulsiva da terra, resultando em grande compactação das formas de onda encontradas no traço sísmico. Para isto foram avaliadas e comparadas as técnicas de Wang e Mendel (1992), Sacchi (1997) e de Dondurur (2010), onde eram esperados bons resultados na presença de ruído e para pulsos que não possuem fase mínima.

No capítulo 3 é apresentada a teoria dos algoritmos de deconvolução cega estudados. Neste foi detalhada a utilização de medidas baseadas em entropia para a deconvolução, avaliando principalmente a metodologia de Levy e Oldenburg (1987) e a de Sacchi, Velis e Comínguez (1994). Também foram estudados métodos de deconvolução que fazem uso das técnicas de deconvolução homomórfica, através do método proposto em Otis e Smith (1977), e de cicloestacionariedade da resposta impulsiva baseado na técnica proposta em Luo e Li (1998), com o método proposto por Wang et al. (2007).

No capítulo 4 são mostrados testes em dados sintéticos, mostrando como os algoritmos podem ser empregados.

No capítulo 5 são mostrados resultados obtidos com os algoritmos estudados sobre dados reais.

Nos capítulos 6 e 7 são apresentados respectivamente a discussão dos resultados e a conclusão do trabalho sugerindo formas de continuação da pesquisa.

2 CASO DETERMINÍSTICO

Neste capítulo foi estudada a deconvolução do traço sísmico quando a *wavelet* é conhecida. Também será abordado o caso de extração do pulso quando a resposta impulsiva é conhecida.

Neste capítulo, e em toda a dissertação, foi adotado o seguinte modelo convolucional do traço sísmico:

$$x(t) = w(t) * r(t) + n(t), \quad (2.1)$$

onde, $x(t)$ é o traço sísmico resultado da convolução (*) entre a *wavelet* $w(t)$ e a resposta impulsiva $r(t)$ com a adição de ruído aleatório gaussiano $n(t)$. Aqui foi adotada a aproximação de que não ocorre dispersão ou atenuação do sinal na passagem pela Terra.

Os algoritmos estudados também não consideram a presença de ruído correlacionável, como o *ground-roll* no caso do estudo das reflexões. Na aplicação a dados reais serão realizadas correções, como mute, filtragem do espectro de amplitude e do espectro f-k para que estes sejam reduzidos ao máximo.

2.1 EXTRAÇÃO DO PULSO

2.1.1 ESTIMATIVA POR MÍNIMOS QUADRADOS

Quando a resposta impulsiva é conhecida a extração do pulso contido no traço sísmico, pode ser vista como um problema inverso linear, onde a equação (2.1) pode ser reescrita na forma matricial, como

$$x = R \cdot w + n \quad (2.2)$$

sendo R a matriz de convolução da resposta impulsiva com a forma de onda.

A equação (2.2) representa um sistema que pode ser resolvido no sentido de mínimos quadrados pela minimização da soma dos quadrados dos erros. Este erro pode ser expresso como

$$E(w) = (x - Rw)^T (x - Rw). \quad (2.3)$$

Minimizando (2.3) através de $\nabla_w[E(w)] = 0$ obtém-se

$$w = (R^T R)^{-1} R^T x. \quad (2.4)$$

A presença de ruído no traço leva a uma solução instável de (2.4) e para contornar este problema esta equação precisa ser regularizada. A regularização se baseia na utilização de alguma informação a priori sobre o significado físico da solução procurada.

Neste caso (2.3) pode ser substituída por uma formulação mais geral

$$E(w) = (x - Rw)^T D_x (x - Rw) + \mu(w - w_0)^T D_w (w - w_0) \quad (2.5)$$

Em (2.5) o primeiro termo representa o desajuste da solução em relação ao dado e o segundo é o termo regularizador. Os termos D_x e D_w são matrizes de peso, w_0 corresponde a uma solução inicial para o sistema e μ representa o peso da regularização.

A (2.5) pode ser minimizada através do gradiente de E:

$$\nabla_w[E(w)] = (-2)R^T D_x (x - Rw) + 2\mu D_w (w - w_0). \quad (2.6)$$

Igualando (2.6) a zero e definindo $s_0 = x - Rw_0$, obtém-se

$$\begin{aligned} R^T D_x s_0 &= R^T D_x R (w - w_0) + \mu D_w (w - w_0) = \\ &= (R^T D_x R + \mu D_w)(w - w_0) \end{aligned} \quad (2.7)$$

Reorganizando (2.7) obtém-se de forma explícita

$$w = w_0 + (R^T D_x R + \mu D_w)^{-1} R^T D_x s_0. \quad (2.8)$$

Nesta etapa será adotada a aproximação de que w_0 é um vetor nulo e D_x é a matriz identidade, avaliando apenas a utilização de D_w .

Definindo $D_w = D^T D$ é obtido

$$w = (R^T R + \mu D^T D)^{-1} R^T x. \quad (2.9)$$

Se em (2.8) o termo D_w for igual à matriz identidade esta forma de mínimos quadrados é conhecida como mínimos quadrados amortizados e a soma de uma constante na diagonal principal da matriz $R^T R$ é equivalente ao pré-branqueamento, termo comumente utilizado na deconvolução.

Dependendo do tipo de problema, pode ser necessário substituir a matriz identidade em (2.8) por uma matriz de peso que considere como deve ser a saída desejada. Com isto, D em (2.9) pode assumir diferentes formas de acordo com o problema estudado. Como exemplo tem-se

$$D = \begin{bmatrix} -1 & 1 & & & & & & & \\ & -1 & 1 & & & & & & \\ & & \cdot & \cdot & & & & & \\ & & & \cdot & \cdot & & & & \\ & & & & \cdot & \cdot & & & \\ & & & & & \cdot & \cdot & & \\ & & & & & & \cdot & \cdot & \\ & & & & & & & \cdot & \cdot \\ & & & & & & & & -1 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2.10)$$

ou

$$D = \begin{bmatrix} 1 & -2 & 1 & & & & & & \\ & 1 & -2 & 1 & & & & & \\ & & \cdot & \cdot & \cdot & & & & \\ & & & \cdot & \cdot & \cdot & & & \\ & & & & \cdot & \cdot & \cdot & & \\ & & & & & \cdot & \cdot & \cdot & \\ & & & & & & \cdot & \cdot & \\ & & & & & & & 1 & -2 & 1 \end{bmatrix}. \quad (2.11)$$

As matrizes (2.10) e (2.11) são utilizadas como aproximação da primeira e segunda derivada da solução. A utilização da matriz (2.10) é uma aproximação de diferenças de finitas que favorece soluções planas. Já a aplicação de (2.11) na matriz de peso penaliza as soluções rugosas, de acordo com a segunda derivada.

2.2 DECONVOLUÇÃO DETERMINÍSTICA

Usualmente, para a deconvolução do traço sísmico quando a forma de onda é conhecida, é realizada a aproximação de que o pulso presente no traço sísmico possui fase mínima, já que fontes impulsivas geram *wavelets* com esta característica e a atenuação decorrente do caminho percorrido pelo sinal também possui fase mínima. Além disso, a convolução de diferentes sinais de fase mínima resulta em uma saída de fase mínima. O filtro construído para o sinal de fase mínima possui a mesma característica de fase e consequentemente é convergente.

Quando a fase do pulso não é mínima os filtros obtidos são divergentes, levando a uma resposta indesejável. Um filtro mais eficiente pode ser obtido através da utilização do critério de mínimos quadrados e também da adequação da saída desejada à forma do pulso. Aqui foi avaliada a estabilização da solução para que sejam evitados problemas quanto à presença de ruído e de pulsos de fases diferentes da mínima.

2.2.1 DECONVOLUÇÃO REGULARIZADA POR CAUCHY

O procedimento de deconvolução é mal posto e precisa ser regularizado. A forma usual é a utilização do pré-branqueamento, o que é equivalente à soma de uma constante na diagonal principal da matriz de sensibilidade do problema inverso, como em (2.9). Este tipo de regularização leva resíduos indesejáveis como lóbulos laterais juntos aos impulsos, Figura 2.1.

Figura 2. 1 Exemplo de forma de onda filtrada, utilizando o pré-branqueamento como regularização.

No trabalho de Sacchi (1997) foram utilizados métodos de reponderação do fator de regularização de forma que não seja somado um valor constante para toda a diagonal principal. Deste ponto do texto em diante esta metodologia é chamada de método de Cauchy ou deconvolução de Cauchy por simplicidade.

Considerando a equação (2.1), o objetivo da deconvolução é novamente minimizar o resíduo (2.3), agora com r como incógnita.

$$E(r) = (x - Wr)^T(x - Wr) \quad (2.12)$$

Na metodologia proposta em Sacchi (1997), a obtenção de uma solução por mínimos quadrados é dada pela minimização de uma função objetivo J_r e como citado anteriormente esta precisa ser estabilizada. Isto é realizado através da soma de uma pequena perturbação constante na diagonal da matriz $W^T W$, o que é equivalente a minimização da seguinte função objetivo modificada

$$J = J_r + J_x, \quad (2.13)$$

onde,

$$J_r = \sum_k \rho_1 \left(\frac{e_k}{\sigma_k} \right), \quad k = 1, \dots, n_x \quad (2.14)$$

e

$$J_x = \sum_k \rho_1 (r_k / \sigma_r). \quad (2.15)$$

Em (2.13) n_x é o número de amostras do traço sísmico, e_k o resíduo, σ_k é o desvio padrão de cada amostra e, por simplicidade, é considerado que $\sigma_k = \sigma_n$. Ainda em (2.13)

$$\rho_1(u) = \frac{1}{2}u^2, \quad (2.16)$$

onde u representa um impulso. Em (2.15), σ_r é o desvio padrão da resposta impulsiva.

Este procedimento é chamado de regularização quadrática de ordem zero, o pré-branqueamento novamente. A função objetivo J , que será expressa como J_{11} é dada por

$$J_{11} = \sum_k \rho_1 \left(\frac{e_k}{\sigma_n} \right) + \sum_i \rho_1 \left(\frac{r_i}{\sigma_r} \right). \quad (2.17)$$

A equação (2.17) é minimizada quando,

$$\hat{r} = (W^T W + \mu I)^{-1} W^T x, \quad (2.18)$$

onde $\mu = \sigma_n^2 / \sigma_r^2$, também chamado de pré-branqueamento, é o fator empregado como regularizador do problema.

O termo J_x em (2.13) pode ser construído por uma estratégia diferente, de forma a diminuir os efeitos indesejáveis observados na regularização quadrática de ordem zero. Em (2.17) o termo ρ_1 é utilizado para modelar o desajuste do dado. Para a regularização, outro termo pode ser introduzido:

$$\rho_2(u) = \ln \left(\frac{u^2}{2} + 1 \right). \quad (2.19)$$

Quando u é pequeno $\rho_2 \rightarrow \rho_1$. A função de influência correspondente a ρ_2 é dada por

$$\psi_2(u) = \frac{u}{(u^2/2)+1}. \quad (2.20)$$

Adotando o termo ρ_2 o problema de deconvolução pode ser resolvido minimizando a função objetivo dada por J_{12} , que pode ser derivada através da regra de Bayes como segue.

A distribuição condicional dos dados de acordo com a resposta impulsiva pode ser escrita como

$$\begin{aligned} f(x|r) &= c_1 \exp \left[-\frac{1}{2\sigma_n^2} \sum_{k=1}^{n_x} (x_k - \sum_j w_j r_{k-j})^2 \right] = \\ &= c_1 \exp \left[-\sum_{k=1}^{n_x} \rho_1 \left(\frac{e_k}{\sigma_n} \right) \right] \end{aligned} \quad (2.21)$$

onde c_1 é a constante de normalização. Assumindo que a resposta impulsiva possa ser modelada por uma distribuição de Cauchy obtém-se:

$$p(r) = c_2 \prod_{i=1}^{n_r} \frac{1}{1+(r_i^2/2\sigma_r^2)}. \quad (2.22)$$

A distribuição posterior de r , dada de acordo com a vizinhança do dado $f(x|r)$ e a probabilidade prévia $p(r)$, é proporcional a $f(x|r)p(r)$. Negligenciando o termo normalizador, a distribuição posterior pode ser escrita como

$$\begin{aligned} f(x|r)p(r) &= \\ &= c_1 \exp \left[-\sum_{k=1}^{n_x} \rho_1 \left(\frac{e_k}{\sigma_n} \right) \right] c_2 \prod_{i=1}^{n_r} \left(1 + \frac{r_i^2}{2\sigma_r^2} \right)^{-1} = \\ &= c_1 \exp \left[-\sum_{k=1}^{n_x} \rho_1 \left(\frac{e_k}{\sigma_n} \right) \right] c_2 \exp \left[-\sum_{i=1}^{n_r} \ln \left(1 + \frac{r_i^2}{2\sigma_r^2} \right) \right] = \\ &= c_1 \exp \left[-\sum_{k=1}^{n_x} \rho_1 \left(\frac{e_k}{\sigma_n} \right) \right] c_2 \exp \left[-\sum_{i=1}^{n_r} \rho_2 \left(\frac{r_i}{\sigma_r} \right) \right] = c_1 c_2 \exp(-J_{12}). \end{aligned} \quad (2.23)$$

A maximização da distribuição posterior é equivalente a minimização da função objetivo:

$$J_{12} = \sum_k \rho_1 \left(\frac{e_k}{\sigma_n} \right) + \sum_i \rho_2 \left(\frac{r_i}{\sigma_r} \right). \quad (2.24)$$

Isto leva a

$$r = (W^T W + \mu Q)^{-1} W^T x, \quad (2.25)$$

onde Q tem os seguintes elementos diagonais,

$$Q_{ii} = \frac{1}{1+(r_i^2/2\sigma_r^2)}. \quad (2.26)$$

É possível mostrar que a variância em (2.26) pode ser escrita como

$$\sigma^2(r_i) = \sigma_r^2 + \frac{r_i^2}{2}, \quad (2.27)$$

que mostra um crescimento parabólico com a amplitude de r .

Com isto a (2.25) pode ser resolvida de forma iterativa como segue:

- Passo 1: Computar μ e Q^0
- Passo 2: Enquanto um número de iterações estipulado não for atingido faça:

- Passo 3: $r^k = (W^T W + \mu Q^{(k-1)})^{-1} W^T x$ (2.28)

onde k é o número da iteração

- Passo 4: Compute um novo Q^k

A escolha de μ foi mais detalhada na seção de testes sintéticos e para Q^0 foi utilizada a matriz identidade.

2.2.2 DECONVOLUÇÃO DE GOLD

O método de deconvolução de Gold, aplicado primeiramente no processamento de espectros gama em Morhac et al. (1997) e recentemente proposto para a utilização na deconvolução sísmica por Dondurur (2010), é baseado no algoritmo de Van Cittert que obtém uma solução para um sistema linear de forma iterativa.

A equação (2.1) escrita na forma matricial e sem a presença de ruído também pode ser expressa como

$$x = W.r \quad (2.29)$$

onde W é a matriz de convolução do pulso sísmico com a resposta impulsiva.

Na sua forma mais básica, a equação que descreve as iterações do algoritmo de Van Cittert pode ser escrita como segue

$$r^{k+1} = r^k + \mu(x - W.r^k), \quad (2.30)$$

onde k é o número de iterações.

A equação (2.30) trabalha com uma estimativa inicial r^0 . Se esta for correta a diferença entre o vetor x observado e o produto $W.r^0$ será nula. Se não for obtido um valor nulo, esta diferença será ponderada e adicionada à estimativa inicial resultando na primeira estimativa r^1 .

O critério de convergência de (2.30) é

$$|W_{ii}| > \sum_{j \neq i} W_{ij}. \quad (2.31)$$

Para que este critério seja satisfeito, a equação (2.30) precisa ser modificada. Introduzindo a matriz

$$D = I - \mu W, \quad (2.32)$$

onde I é a matriz identidade. Substituindo D em (2.30) obtém-se

$$r^{k+1} = \mu x + D r^k. \quad (2.33)$$

Com $r^0 = \mu x$ as sucessivas substituições retornam a equação

$$\begin{aligned} r^k &= \mu x + \mu D x + \dots + \mu D^{k-1} x + \mu D^k x = \\ &= \mu(I + D + \dots + D^k)x \end{aligned} \quad (2.34)$$

Supondo $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ os autovalores de W , sabe-se da equação (2.32) que $(1 - \mu\lambda_1), (1 - \mu\lambda_2), \dots, (1 - \mu\lambda_n)$ são os autovetores de D .

Se para todo

$$i \in \{1, \dots, n\} \quad , \quad (1 - \mu\lambda_i)^k \xrightarrow{k \rightarrow \infty} 0 ,$$

então $D^k \xrightarrow{k \rightarrow \infty} [0]$, o que significa que a equação (2.34) converge e então $r^k \rightarrow r$. Para que este resultado seja obtido, a condição necessária e suficiente é que para todo $i \in \{1, \dots, n\}$,

$$|1 - \mu\lambda_i| < 1$$

Escrevendo de outra forma:

$$(1 - \mu\lambda_i)(1 - \mu\bar{\lambda}_i) < 1$$

e, λ_i e o seu conjugado como,

$$\lambda_i = a_i + jb_i \text{ e } \bar{\lambda}_i = a_i - jb_i,$$

respectivamente, têm-se

$$\mu[\mu(a_i^2 + b_i^2 - 2a_i)] < 0. \quad (2.35)$$

A inequação (2.35) possui duas raízes:

$$\mu = 0 \text{ e } \mu = 2 \frac{a_i}{a_i^2 + b_i^2} . \quad (2.36)$$

Com isto têm-se n intervalos com os dois limites dados pela equação (2.36). Se a intersecção destes n intervalos existe, é possível encontrar um μ dentro da intersecção. Desta forma a convergência de (2.34) está garantida. É sempre possível encontrar um μ dentro da intersecção que leva para uma solução convergente se a matriz W for positiva definida.

Supondo que W seja positiva definida de forma que todos os seus autovalores sejam positivos, os dois limites em (2.36) se tornam $0 < \mu < 2/\lambda_i$, $i \in \{1, \dots, n\}$. Desta forma o maior autovalor λ_{max} de W define uma intersecção comum a todos n intervalos $0 < \mu < 2/\lambda_{max}$.

A equação (2.30) converge para todo μ dentro deste intervalo.

Multiplicando os dois lados da equação (2.29) por $W^T W W^T$ obtém-se

$$W^T W W^T x = W^T W W^T W r \quad (2.37)$$

Assim a forma (2.30) se torna

$$r^{(n+1)} = r^{(n)} + \mu[W^T W W^T x - W^T W W^T W r^{(n)}], \quad (2.38)$$

sendo que a matriz $W^T W W^T W$ é positiva definida, o que resolve o problema de convergência.

Entretanto, em Morhac et al. (1997) foi observado que a operação $W^T W W^T W$ é redundante e que a omissão do termo $W^T W$ leva a melhores resultados, mantendo a convergência. De forma que a (2.38) pode ser reescrita como

$$r^{(n+1)} = r^{(n)} + \mu [W^T x - W^T W r^{(n)}]. \quad (2.39)$$

Considerando um sistema da forma

$$z = Tr, \quad (2.40)$$

onde T é igual a $W^T W$. E substituindo em (2.39) obtém-se,

$$r^{(n+1)} = r^{(n)} + \mu [z - Tr^{(n)}]. \quad (2.41)$$

Com isso, a variável μ é caracterizada como uma variável μ_i para cada elemento do vetor r .

$$\mu_i = \frac{r^{(n)}(i)}{d(i)} \quad (2.42)$$

onde $d = Tr^{(n)}$, levando a equação final do algoritmo de Gold

$$r_i^{(n+1)} = \frac{z_i}{d_i} r_i^{(n)} \quad i = 1, 2, \dots, N. \quad (2.43)$$

onde n é o número da iteração.

No trabalho de Morhac e Matousek (2005) foi sugerido para a solução inicial o vetor

$$r_i^{(1)} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix}_{(N) \times (1)} \quad (2.44)$$

Um ponto importante do algoritmo é que este converge para uma solução estável, sendo assim, depois de alcançada esta estabilidade o aumento no número de iterações não modifica a resposta. Entretanto a resolução obtida no estado estável pode ser melhorada através da aplicação de um fator de impulsionamento do algoritmo. Com isto em mente Morhac (2005) organiza o algoritmo da seguinte forma:

- Passo 1: Construção da solução inicial (2.44) e estabelecimento do número de iterações (L) do algoritmo e de repetições (K) do fator de impulsionamento.
- Passo 2: Estabeleça $k=1$ como o número de repetições.
- Passo 3: Enquanto k for menor que K
 - Passo 4: Enquanto L não é atingido encontre a solução de (2.43)
 - Passo 5: Se $k < K$
 - Faça $r^{(0)}(i) = [r^{(L)}(i)]^p; i = 0, 1, \dots, N - 1$
 - onde p é o fator de impulsionamento > 0

- Passo 6: $k = k+1$;

Neste trabalho foram obtidos melhores resultados com $p=5$.

2.2.3 DECONVOLUÇÃO POR REDES NEURAIS DE HOPFIELD

As redes neurais artificiais imitam as funções das redes neurais biológicas em um nível simples, sendo empregadas usualmente na automação da identificação de padrões complexos e ocultos nos dados.

As redes neurais propostas por Hopfield (1984) são diferenciadas da maioria das redes neurais, já que a sua função é ser uma memória associativa em invés de utilizar a associação para a realização de uma classificação ou estimativa. Além disso, em vez de minimizar uma função de erro, estas redes minimizam uma função de energia.

Nas redes de Hopfield, um neurônio é um elemento que recebe múltiplas entradas e fornece uma única saída. Na Figura 2.2 o neurônio 1 possui as entradas $I_1, q_2, \dots, q_N$ e a saída q_1 . O termo T_{ij} representa peso da conexão do neurônio j para o neurônio i , o termo I_i uma entrada externa dada ao neurônio i e q_i a saída do neurônio i .

Figura 2. 2: Modelo esquemático da rede neural de Hopfield, adaptado de Wang e Mendel (1992).

A dinâmica da rede neural de Hopfield que foi descrita e que possui saída zero ou um para seus termos q_i pode ser escrita pelas seguintes equações,

$$D_i = \sum_{j=1}^N T_{ij} q_j + I_i \quad (2.45)$$

e

$$q_i = \begin{cases} 0, & \text{se } D_i \leq 0 \\ 1, & \text{se } D_i > 0 \end{cases} \quad (2.46)$$

A rede neural de Hopfield deve então minimizar a seguinte função de energia

$$E = -\frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N T_{ij} q_i q_j - \sum_{i=1}^N I_i q_i \quad (2.47)$$

Em (2.47) se T_{ij} for simétrico pode ser mostrado que, conforme muda o estado dos neurônios (q_i 's), a função de energia nunca irá aumentar.

No trabalho de Wang e Mendel (1992) os valores de saída de zeros e uns, das redes neurais foram aproveitados na construção de um detector das reflexões sísmicas, o que pode ser visualizado também como um algoritmo de deconvolução que promove grande compactação da forma de onda no traço sísmico. Para isto a função objetivo (2.48), equivalente a (2.3) na forma de somatório, deve ser vinculada a (2.47).

$$E = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^N [x_k - \sum_{i=1}^N w_{k-i} r_i]^2 \quad (2.48)$$

Para que (2.47) e (2.48) possam ser vinculadas, a resposta impulsiva deve ser decomposta da seguinte forma,

$$r_i = q_i \alpha_i, \quad (2.49)$$

onde q_i é um vetor composto de zeros e uns e α_i é um valor relativo a amplitude do impulso. Com isto, através da manipulação algébrica, descrita no trabalho de Wang e Mendel, de (2.47), (2.48) e (2.49) é possível escrever os termos T_{ij} e I_i de (2.47) como segue:

$$T_{ij} = -\sum_{k=1}^N w_{k-i} w_{k-j} \quad (2.50)$$

e

$$I_i = \sum_{k=1}^N w_{k-i} \frac{x_k}{\alpha} - \frac{1}{2} \sum_{k=1}^N w_{k-i}^2 \quad (2.51)$$

para $i \neq j$, onde $1 \leq i, j \leq N$; e T_{ij} para $i = 1, 2, \dots, N$.

Esta rede neural pode ser vista como um detector de impulsos pertencentes à resposta impulsiva que possuem uma determinada amplitude α . Como a amplitude verdadeira destes

impulsos não é α , Wang e Mendel (1992) construíram uma segunda rede neural para a determinação correta das amplitudes. Entretanto, neste trabalho foi percebido de forma empírica que quando a busca pelos impulsos inicia por um valor duas vezes maior que o valor do maior impulso, a relação (2.52) mostra bons resultados.

$$\alpha_{\text{verdadeiro}} = (\alpha + d\alpha)/2 \quad (2.52)$$

onde, $d\alpha$ é o intervalo entre os valores de α utilizados na rede neural. Na presença de ruído esta relação pode apresentar um desvio da amplitude real, mas a relação de amplitude dos impulsos é mantida.

O vetor q_i é inicializado como sendo um vetor nulo e o algoritmo finaliza quando este vetor não sofre mudança de uma iteração para outra. Assim o algoritmo de deconvolução por redes neurais pode ser descrito como segue:

- Passo 1: Escolha um α grande e positivo e rode a rede neural dada pelas equações (2.45) e (2.46);
- Passo 2: Determine a amplitude dos impulsos localizados utilizando (2.52);
- Passo 3: Efetue a convolução da resposta impulsiva obtida com a forma de onda e subtraia este traço do traço sísmico original.
- Passo 4: Repita os passos 1 a 3 para α negativo e atualize a resposta imposta impulsiva.
- Passo 5: Diminua α e repita os passos de 1 a 5 sempre atualizando a resposta impulsiva.

Neste trabalho, para evitar que a solução encontrada seja um mínimo local, foi adicionada uma pequena perturbação constante um determinado número de vezes na solução encontrada pela parte do algoritmo que identifica as reflexões, semelhante a proposta da deconvolução de Gold. Desta forma espera-se evitar os mínimos locais com um baixo custo computacional. Outras formas de se evitar os mínimos locais podem ser encontradas, por exemplo, no trabalho de Calderón-Macías et al. (1997).

3 CASO CEGO

Neste capítulo são descritos quatro procedimentos. O primeiro é o algoritmo proposto por Sacchi, Velis e Comíngues (1994), que pode ser considerado como uma melhoria do algoritmo de deconvolução por mínima entropia apresentado originalmente em Wiggins (1978). Este algoritmo retorna o traço deconvolvido que pode ser utilizado posteriormente para uma estimativa do pulso sísmico. O segundo também é uma forma de estabilizar o algoritmo de Wiggins (1978), através da rotação do traço sísmico por uma fase constante. O terceiro utiliza o conceito de deconvolução homomórfica para estimativa do pulso. E o quarto procedimento também será baseado na estimativa da forma de onda para posterior aplicação na deconvolução do traço sísmico. Esta estimativa utiliza a redundância da informação contida em um arranjo multicanal, neste caso o conceito de entropia será aplicado apenas na melhoria da precisão da estimativa.

3.1 DECONVOLUÇÃO POR MÍNIMA ENTROPIA COM RESTRIÇÕES NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA

3.1.1 ENTROPIA

O termo entropia foi introduzido na termodinâmica por Clausius (1875) e foi utilizado na teoria de comunicações por Shannon (1948) como uma medida de incerteza.

$$H = -\sum_i p_i \log p_i, \quad (3.1)$$

com

$$\sum_{i=1}^N p_i = 1, \quad (3.2)$$

onde N é o número de eventos e p_i é a probabilidade do evento i .

Quando apenas um evento é possível, H será igual a zero e será obtido um valor mínimo de entropia. Em contrapartida quando N eventos são possíveis têm-se,

$$p_i = \frac{1}{N}, \quad i = 1, \dots, N. \quad (3.3)$$

Substituindo (3.3) em (3.1) é obtido o valor $\log(N)$, o máximo valor possível para H .

Com isto, pode ser definida uma medida H' simétrica à entropia. Esta pode ser expressa por

$$H' = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Np_i) \log(Np_i). \quad (3.4)$$

A relação entre H e H' pode ser visualizada como,

$$H' = \log(N) - H. \quad (3.5)$$

A Figura (3.1) mostra o comportamento de versões normalizadas de H e H' para distribuições de probabilidade diferentes com $N=8$. Para uma distribuição esparsa e com poucos impulsos são obtidos valores baixos para H e altos para H' . E quanto mais suave e densa for a distribuição maiores serão os valores de H e menores os de H' . Também deve ser notado que ambas as medidas não são afetadas pelo espaçamento ou pela ordem da distribuição de impulsos.

Figura 3. 1: Comportamento das medidas de H e H' para diferentes distribuições de probabilidade, adaptado de De Vries (1984).

Se os conceitos expressos forem traduzidos para o caso sísmico pode-se definir uma norma V da mesma forma que H' :

$$V(r) = \frac{1}{NF(N)} \sum_{i=1}^N q_i \log(q_i), \quad (3.6)$$

onde

$$q_i = \frac{a_i}{\sum_i a_i / N} \quad (3.7)$$

e a_i representa um parâmetro de amplitude positivo definido relacionado a resposta impulsiva em um determinado ponto i .

A maximização da norma V , assim como para H' , é obtida para uma resposta impulsiva esparsa e com poucos impulsos, como em (a) na Figura (3.1). Esta é uma distribuição de amplitudes de mínima entropia. Já o sismograma antes da deconvolução, que é suave, é uma distribuição de amplitudes de máxima entropia com valor de V mais baixo.

3.1.2 DECONVOLUÇÃO POR MÍNIMA ENTROPIA (MED)

Quando se trata de deconvolução cega, o algoritmo de deconvolução por mínima entropia proposto em Wiggins (1978) foi pioneiro no processamento sísmico. O método não faz premissas quanto às características da fase do pulso sísmico e também não assume uma distribuição aleatória para a resposta impulsiva, embora seja também adequado para esta situação como provado em Donoho (1981).

A técnica MED busca o menor número de impulsos consistentes com o dado, maximizando a norma varimax ou kurtosis (equação 3.8) que assim como (3.6) mede a simplicidade do sinal:

$$V(r) = \frac{1}{NF(N)} \sum_{i=1}^N q_i F(q_i), \quad (3.8)$$

com $F(q_i) = q_i$ e $a_i = r_i^2$.

O parâmetro de amplitude a_i pode ser escolhido de diferentes formas sendo que r_i^2 é pouco sensível a pequenas amplitudes. Este foi um dos problemas que levou a MED a cair em desuso. Foi percebido que neste tipo de deconvolução a resposta impulsiva obtida perde as reflexões mais fracas e o método se torna instável para dados com banda muito limitada.

Na tentativa de corrigir estes problemas Sacchi, Velis e Comínguez (1994) propuseram uma versão modificada da MED, a deconvolução por mínima entropia com restrições no domínio da frequência (FMED). Onde, assim como em Postic et al. (1980) foi utilizada uma norma logarítmica, versão normalizada de (3.6), juntamente com a relação $a_i = r_i^2$, para que os impulsos mais fracos não fossem perdidos. A norma (3.6) possui convergência mais lenta e, mesmo que a_i seja igualado a r_i^2 , faz com que as pequenas amplitudes tenham maior influência no resultado final.

Em conjunto com esta norma foi adotado um processo de refinamento da solução no domínio da frequência, corrigindo a deficiência da metodologia quanto à limitação da banda espectral. Este procedimento é descrito nos próximos parágrafos.

Maximização de V

O objetivo do algoritmo é obter um filtro f_t que faça a deconvolução do traço sísmico comprimindo a forma de onda e retornando a resposta impulsiva, ou seja,

$$r_t = x_t * f_t \quad (3.9)$$

Entretanto, se a presença de ruído for considerada o filtro também deve ser capaz de suprimi-lo. Na equação (3.10), que detalha melhor a (3.9), o termo $a_t = f_t * w_t$ deve se aproximar de um delta de Dirac e concomitantemente manter baixo o nível de ruído. Portanto será obtida apenas uma estimativa de r_t :

$$\hat{r}_t = a_t * r_t + f_t * n_t = r_t + (a_t - \delta_t) * r_t + f_t * n_t. \quad (3.10)$$

Tanto o kurtosis quanto a norma logarítmica utilizada na metodologia FMED fazem parte de uma família de normas do tipo (3.8) com diferentes valores de $F(q_i)$. O critério para a construção de um filtro f_k de comprimento L, baseado neste tipo de norma, pode ser obtido tomando a derivada parcial da norma V em relação ao filtro e igualando o resultado a zero:

$$\begin{aligned} \frac{\partial V(r)}{\partial f_k} &= 0, \quad k = 1, 2, \dots, L; \\ \frac{\partial V(r)}{\partial f_k} &= \frac{1}{NF(N)} \sum_i \left(F(q_i) + q_i \frac{\partial F(q_i)}{\partial q_i} \right) \frac{\partial q_i}{\partial f_k} \end{aligned} \quad (3.11)$$

Pela equação (3.9) têm-se $\frac{\partial r_n}{\partial f_k} = x_{n-k}$, com isto a equação (3.11) pode ser reescrita na forma

$$\sum_l f_l \sum_n x_{n-k} x_{n-l} = \sum_i b_i x_{i-k}, \quad (3.12)$$

onde

$$b_i = \frac{G(q_i) r_i}{\frac{1}{N} \sum_j G(q_j) q_j}, \quad (3.13)$$

e

$$G(q_i) = F(q_i) + q_i \frac{\partial F(q_i)}{\partial q_i}. \quad (3.14)$$

A Tabela (3.1) mostra de forma resumida os termos b_i e V para $F(q_i) = q_i$ (kurtosis) e para $F(q_i) = \ln(q_i)$ (norma logarítmica).

Tabela 3. 1: Norma V e saída desejada b_i . (a) Kurtosis e (b) norma (3.6) normalizada.

$F(q_i)$	V	b_i
a) q_i	$\frac{1}{N} \sum_i q_i q_i$	$\frac{q_i \cdot r_i}{N \cdot V}$
b) $\ln(q_i)$	$\frac{1}{N \cdot \ln(N)} \sum_i q_i \cdot \ln(q_i)$	$\frac{(\ln(q_i) + 1) \cdot r_i}{N \cdot V + 1}$

A equação (3.12) tenta levar o sismograma x para uma projeção ou saída desejada b e de forma resumida pode ser reescrita como

$$f \cdot C = g(f). \quad (3.15)$$

Esta equação deve ser resolvida de forma iterativa, reorganizando (3.15) obtém-se

$$f^{(n)} = C^{-1} \cdot g(f^{(n-1)}), \quad (3.16)$$

onde n é relativo ao número da iteração e o filtro pode ser inicializado como $f = (0,0,0, \dots, 1, \dots, 0,0,0)$.

Se o comprimento do filtro for adequado será obtida uma estimativa da resposta impulsiva. Esta estimativa pode ser melhorada através da recuperação do espectro além da banda limitada do sinal.

3.1.3 RESTRIÇÕES NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA

No domínio da frequência pode ser observado que a resposta impulsiva é recuperada apenas dentro de um espectro de banda limitada, já que a maximização da norma está vinculada as seguintes restrições:

$$R(\omega) = \hat{R}(\omega), \quad \omega \in [\omega_L, \omega_H]. \quad (3.17)$$

O problema de estimativa da resposta impulsiva de banda completa R a partir da resposta impulsiva de banda limitada $\hat{R}$ pode ser escrito em termos da transformada discreta de Fourier como segue,

$$\hat{R}_k = A_k \cdot R_k \quad (3.18)$$

onde k é o número de amostra no domínio da frequência. Desta forma, a maximização de $V(r)$ no domínio da frequência adquire a forma

$$\text{Maximize } V(r),$$

sujeito a

$$R_k = \sum_{n=0}^{N-1} \hat{r}_n e^{\frac{-i2\pi kn}{N}}, \quad k = k_L, \dots, k_H, \quad (3.19)$$

onde k_L e k_H são as amostras correspondentes aos pontos de frequência mínima e frequência máxima respectivamente. Onde pode ser observado que a informação entre as frequências mínima e máxima não deve ser modificada, já que esta foi recuperada por um algoritmo prévio de deconvolução.

Este problema pode ser resolvido através da resolução do sistema de equações:

$$\frac{\partial V(r)}{\partial R_k} + \sum_{l=k_L}^{k_H} \lambda_l \frac{\partial R_l}{\partial R_k} \left(R_l - \sum_{n=0}^{N-1} \hat{r}_n e^{\frac{-i2\pi nl}{N}} \right) = 0 \quad (3.20)$$

$$R_k - \sum_{n=0}^{N-1} \hat{r}_n e^{\frac{-i2\pi nk}{N}} = 0, \quad k = k_L, \dots, k_H \quad (3.21)$$

onde λ_l representa os multiplicadores de Lagrange do problema. Derivando, inserindo R_k na restrição e então colocando os multiplicadores na equação (3.20), o resultado a seguir pode ser obtido:

$$R_k = \begin{cases} \frac{\sum_{n=0}^{N-1} \frac{G(q_n) r_n e^{\frac{-i2\pi kn}{N}}}{\sum_j \frac{G(q_j) q_j}{N}}}{\sum_j \frac{G(q_j) q_j}{N}}, & k \notin [k_L, k_H]; \\ \hat{R}_k, & k \in [k_L, k_H]. \end{cases} \quad (3.22)$$

Através das equações (3.13) até (3.17) é possível perceber que a (3.22) pode ser reescrita como,

$$R_k = \begin{cases} B_k, & k \notin [k_L, k_H]; \\ \hat{R}_k, & k \in [k_L, k_H], \end{cases} \quad (3.23)$$

onde B_k é a transformada discreta de Fourier da equação (3.13). Como b_t é uma função não linear o problema no domínio da frequência também deverá ser resolvido de forma iterativa. Assim, no domínio da frequência a (3.23) assume a forma

$$R_k^{(n)} = B_k^{(n-1)} \cdot H_k + \hat{Y}_k, \quad (3.24)$$

e no domínio do tempo,

$$r_t^{(n)} = b_t^{(n-1)} * h_t + \hat{r}_t, \quad (3.25)$$

onde H_k e h_t representam filtros de fase zero construídos de forma a eliminar a informação presente entre as frequências mínima w_l e máxima w_h .

Formulação do Algoritmo

O algoritmo completo pode ser resumido nas seguintes etapas e passos:

Etapas 1: Estimativa da resposta impulsiva no domínio do tempo sem restrições

- Passo 1: Inicialize o filtro como $f = (0,0,0, \dots, 1, \dots, 0,0,0)$.
- Passo 2: Aplique o filtro sobre o traço sísmico e calcule o valor para a norma considerada.
- Passo 3: Enquanto houver mudança significativa da norma ou um número de iterações não for atingido faça:
 - Passo 4: Obtenha um novo filtro por (3.16)
 - Passo 5: Aplique o filtro sobre o traço sísmico e calcule o valor para a norma considerada.
- Passo 6: Aplique o filtro final obtido sobre o traço.

Na próxima etapa será utilizada a formulação quando a equação (3.24) for adotada,

Etapas 2: Refinamento da estimativa com restrições no domínio da frequência

- Passo 1: A estimativa inicial $\hat{r}_t$ será a estimativa final da primeira etapa.
- Passo 2: Enquanto houver mudança significativa da norma ou um número de iterações não for atingido faça:
 - Passo 3: Calcule b_t e B_k .
 - Passo 4: Obtenha uma estimativa para R_k por (3.24).
 - Passo 5: Calcule a transformada inversa de Fourier para R_k e obtenha r_t .

O último r_t obtido é a estimativa final para a resposta impulsiva.

3.2 ROTAÇÃO POR FASE CONSTANTE

Outra forma de estabilizar os problemas encontrados na aplicação da MED foi introduzida por Levy and Oldenburg (1987), Longbottom et al. (1988) e White (1988) e retomada recentemente, por exemplo, em Van der Baan (2008), Van der Baan e Pham (2008) e Fomel e Van der Baan (2010). Nesta técnica o traço sísmico é rotacionado por uma fase constante até que o traço possua um valor máximo de kurtosis, desta forma os impulsos no traço sísmico devem atingir a fase zero.

Para isto a rotação do traço pode ser realizada por

$$x_{rot} = x(t)\cos\phi + H[x(t)]\sin\phi, \quad (3.26)$$

onde ϕ é o ângulo de rotação e H representa a transformada de Hilbert.

A busca pelo ângulo correto pode ser realizada por uma busca exaustiva variando o ângulo de 0° a 180° . Segundo o trabalho de Berkhout (1977) formas de onda de fase zero são as que possuem menor comprimento e maior amplitude, por este motivo este método poderia funcionar como uma deconvolução do traço sísmico.

Outro ponto importante que pode ser considerado é a variação da fase pulso com o afastamento da fonte. Esta metodologia também poderia ser empregada na correção deste problema para adequar o uso de único filtro de deconvolução aos traços de um sismograma que apresente defasagem com o afastamento.

3.3 ESTIMATIVA HOMOMÓRFICA

A deconvolução homomórfica é uma técnica não-linear que pode ser utilizada como um método cego de deconvolução. Os sistemas homomórficos originalmente propostos por Oppenheim (1965a) e (1965b) são uma classe de sistemas não-lineares que satisfazem um princípio generalizado de sobreposição e podem ser utilizados na separação de sinais combinados por convolução.

Avaliando a equação (2.1) sem a presença de ruído, por simplicidade da dedução, obtém-se a forma (3.27) no domínio da frequência:

$$X(f) = W(f).R(f). \quad (3.27)$$

Calculando o logaritmo esta equação pode ser separada na soma:

$$Z(f) = \log W(f) + \log R(f). \quad (3.28)$$

O cálculo da transformada inversa de Fourier de (3.28) leva ao cepstro complexo do vetor $x(t)$:

$$z_c(q) = w_c(q) + r_c(q). \quad (3.29)$$

Neste ponto o sinal é novamente observado em um “domínio do tempo” onde os sinais estão combinados de forma mais simples. Foi observado que no cepstro complexo o sinal da forma de onda se concentra próximo ao zero enquanto que o sinal correspondente a resposta impulsiva se apresenta em valores mais altos de q na equação (3.29). Como um exemplo na figura 3.2 é mostrado o cepstro complexo de uma *wavelet*, da resposta impulsiva, do sismograma gerado pela sua convolução no domínio do tempo e do mesmo após a adição de ruído no domínio do tempo. No cepstro complexo do sismograma fica evidente a adição dos cepstros correspondentes a *wavelet* e a resposta impulsiva e a sua ocorrência em partes diferentes do cepstro. No caso com ruído, há deslocamento e sobreposição dos eventos tornando mais difícil a identificação.

Considerando a ocorrência dos eventos em partes diferentes do cepstro complexo, este método foi estudado por diversos autores, dentre os principais têm-se Oppenheim (1965a) e (1965b), Schafer e Stockham (1968), Ulrych (1971) e Buttkus (1975). Nestes trabalhos o método foi utilizado na aplicação de filtros passa-baixa ou passa-alta para a separação dos sinais observados. Sendo que na sísmica a aplicação de filtros passa-baixa para a estimativa da *wavelet* encontra melhores resultados. Isto porque o ruído aditivo tem uma influência menor sobre a forma de onda tornando possível uma estimativa mais precisa.

Figura 3. 2: Cepstros complexos: de uma *wavelet* (a); resposta impulsiva (b); traço sísmico sem ruído (c); traço sísmico com ruído (d).

Porém, a principal dificuldade encontrada no método está justamente na presença de ruído que torna difícil a separação dos sinais. Por este motivo, aqui foi avaliada a estimativa da forma de onda através da metodologia proposta por Otis e Smith (1977), que calcula a média de um conjunto de traços que possui pulso sísmico constante e uma resposta impulsiva variável ao longo de um conjunto de traços.

Esta metodologia pode ser expressa pelas equações:

$$\frac{1}{N_s} \sum_{s=1}^{N_s} z_c(q) = \frac{1}{N_s} \sum_{s=1}^{N_s} w_c(q) + \frac{1}{N_s} \sum_{s=1}^{N_s} r_c(q) \quad (3.30)$$

onde s é o traço sísmico considerado e N_s é o número total de traços.

Com a premissa de um pulso estacionário ao longo de uma quantidade finita de traços têm-se:

$$\frac{1}{N_s} \sum_{s=1}^{N_s} w_c(q) = w_c(q) \quad (3.31)$$

Para um valor alto de número de traços cada valor de q pode ser considerado uma variável aleatória com probabilidade idêntica e com mesma média K e variância. Pelo Teorema do Limite Central (CLT) a soma

$$\frac{1}{N_s} \sum_{s=1}^{N_s} r_c(q)$$

tende ao valor médio K .

Como neste trabalho é considerada uma possível variação da fase do pulso com o afastamento, aqui também é estudada a aplicação conjunta da rotação por fase constante do item 3.3 com esta metodologia.

3.4 MÉTODO DE IDENTIFICAÇÃO POR RELAÇÃO CRUZADA

O procedimento descrito neste tópico será baseado numa estimativa inicial do pulso sísmico para aplicação na deconvolução do traço sísmico, onde não são utilizadas premissas sobre a distribuição estatística da informação de entrada.

A identificação por relação cruzada (CR) é um método que explora uma estrutura multicanal. Esta metodologia foi descoberta por diversos autores de forma independente em diferentes aplicações (TONG e PERREAU, 1998), e a possibilidade do seu uso na deconvolução sísmica foi apontada inicialmente por Luo e Li (1998). Existe uma grande quantidade de algoritmos que utilizam a estrutura (CR) e nesta dissertação foi escolhido o algoritmo de identificação no domínio da frequência proposto em Wang. et al. (2007). Este método é uma versão do algoritmo de Xu et al. (1995) otimizada para rapidez da estimativa, e possui simples implementação e adequação ao caso sísmico.

3.4.1 IDENTIFICAÇÃO DE CANAIS NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA

Aplicando estritamente o método de Xu et al. (1995) para o caso sísmico, pode ser considerado um caso com dois traços sísmicos diferentes, formados pela convolução de dois pulsos diferentes com a mesma resposta impulsiva da terra. Neste caso, desprezando o ruído para simplicidade, têm-se:

$$\begin{aligned}x_1(t) &= w_1(t) * r(t) \\x_2(t) &= w_2(t) * r(t)\end{aligned}\tag{3.32}$$

A convolução do pulso w_2 com o traço x_1 é igual à convolução do pulso w_1 com o traço x_2 , como a seguir:

$$\begin{aligned}w_2(t) * x_1(t) &= w_2(t)[w_1(t) * r(t)] \\&= w_1(t) * [w_2(t) * r(t)] \\&= w_1(t) * x_2(t).\end{aligned}\tag{3.33}$$

Adotando-se a notação matricial obtém-se:

$$[X_2 - X_1] \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \end{bmatrix} = X \cdot w = 0\tag{3.34}$$

onde X_i representa a matriz de convolução do traço sísmico com a forma de onda.

Para que o vetor w em (3.34) possa ser identificado, existem duas condições principais:

- A transformada Z dos pulsos sísmicos devem ser polinômios que não possuam zeros comuns.
- A resposta impulsiva deve possuir comprimento de pelo menos $2L+1$, onde L é o comprimento da forma de onda.

A primeira condição é necessária para que apenas uma resposta seja possível. Se os vetores w_1 e w_2 compartilharem uma raiz, o vetor w pode ser escrito no domínio Z na forma $\hat{w}(z) = w'(z)(z - z_0)$. Isto deixa evidente que nesta situação qualquer resposta que possua z_0 satisfaz a equação (3.34), fazendo com que o vetor w não possa ser unicamente identificável.

A segunda condição é necessária para que o traço tenha informação suficiente para a identificação, de forma que a matriz de convolução da resposta impulsiva possua posto completo.

A minimização direta de (3.34) leva a solução trivial. Para evitá-la, Xu *et al.* (1995) prova que sob as condições de identificação a matriz X possui posto deficiente de apenas um. Desta forma, se for utilizada a restrição ($\|w\|^2=1$) a solução para o vetor w pode ser obtida através da decomposição da matriz $X^T X$ em seus autovetores e autovalores. No caso sem ruído existe apenas um autovetor que estará vinculado a um autovalor nulo, ou seja, este autovetor será a solução procurada. Na presença de ruído pode ser considerado como resposta o autovetor associado ao menor autovalor obtido.

As equações (3.35) e (3.36) tornam possível calcular a resposta desejada:

$$X^\perp = I - X^T (X X^T)^{-1} \quad (3.35)$$

$$w_e^{(i)} = X^\perp w_e^{(i-1)}, \quad (3.36)$$

onde $w_e^{(i)}$ representa a estimativa da forma de onda na iteração i .

Estas duas equações foram utilizadas também no trabalho de Chen e Lu (2010), onde o modelo de relação cruzada foi utilizado no domínio da frequência para estimativa direta da resposta impulsiva. Isto porque desta forma não foi necessário estimar o comprimento da forma de onda. O algoritmo de Xu et al (1995) assume o conhecimento do comprimento da forma de onda, entretanto esta não é uma informação conhecida a priori. Para uma melhor estimativa, Wang et al. (2007) aproveitaram a eficiência da transformada rápida de Fourier (FFT) para uma estimativa conjunta da forma de onda e de seu comprimento, como é descrito a seguir. Aqui é avaliado se a estimativa da forma de onda primeiramente leva a melhores resultados.

Na aproximação de Wang et al. (2007), a (3.34) pode ser reescrita como

$$[F_2 \quad -F_1] \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \end{bmatrix} = F \cdot w = 0, \quad (3.37)$$

onde, w é igual em (3.34) e (3.37) e $F_m = \text{diag}(X_m) V$ com $m=1,2$, X_m a transformada do vetor que representa o traço sísmico e V sendo a matriz das primeiras L colunas da matriz da transformada discreta de Fourier (DFT).

A equação pode ser minimizada da mesma forma que (3.34), sendo que a construção da matriz F é mais rápida do que a construção da matriz X . Com isto, a etapa de estimativa conjunta das formas de onda e de seus comprimentos pode ser descrita pelo algoritmo de Wang et al. (2007):

Epata 1: Faça de $L=1$ até $L=L_{\max}$

- Passo 1: Construa a matriz F para L .

- Passo 2: Calcule a razão entre o segundo menor e o menor autovalor de F .

Etapa 2: O comprimento L que obtiver a maior razão no Passo 2 é o comprimento ideal.

- Passo 1: Construa a matriz F para o L estimado.
- Passo 2: Estime o vetor w que minimiza a (3.37).

Neste algoritmo L_{max} é um valor limite de comprimento em que a busca será realizada, este pode ser estimado visualmente.

No caso sísmico, a utilização da razão entre o segundo menor e o menor autovalor de F como critério para a estimativa do comprimento L do pulso sísmico apresenta grande sensibilidade à presença de ruído. Por este motivo será estudada também a aplicação de outro critério considerando agora o conceito de entropia, como segue:

Epata 1: Faça de $L=1$ até $L=L_{max}$

- Passo 1: Construa a matriz F para L .
- Passo 2: Estime o vetor w que minimiza a (3.37)
- Passo 3: Realize a deconvolução dos traços sísmicos
- Passo 4: Calcule o valor da norma logarítmica (3.6) normalizada como na Tabela 3.1.

Etapa 2: O comprimento L que obtiver o maior valor da norma logarítmica é o comprimento ideal.

- Passo 1: Construa a matriz F para o L estimado.
- Passo 2: Estime o vetor w que minimiza a (3.37).

Este algoritmo torna a estimativa mais lenta, entretanto espera-se uma resposta mais estável na presença de ruído. A estimativa inicial da *wavelet* será um vetor unitário.

Para a obtenção de duas respostas impulsivas com pulsos diferentes seria necessária à utilização de arranjos específicos ou de tipos diferentes de fontes em campo, o que é um fator limitante. Uma forma de evitar este problema foi estudada em Spadini e Diogo (2011).

Neste trabalho um segundo traço foi simulado a partir do primeiro através da utilização de um filtro.

Mais especificamente a partir do primeiro traço é realizada a estimativa de uma *wavelet* de fase mínima por métodos convencionais, como decomposição de Kolmogoroff que

pode ser encontrada, por exemplo, em Claerbout (1985). A partir deste pulso de fase mínima é construído um filtro de fase qualquer, através do uso da técnica de Wiener *shaping filter*. Este filtro é convolvido com o traço original formando um segundo traço para simular a mesma resposta impulsiva convolvida com um pulso diferente. Esta metodologia foi avaliada nos testes sintéticos.

4 TESTES SINTÉTICOS

Neste capítulo são mostrados os resultados obtidos na aplicação dos algoritmos anteriores sobre dados sintéticos. Estes foram necessários para uma implementação adequada destes assim como a verificação da abordagem a ser tomada na aplicação a dados reais. O processamento e geração de dados sintéticos foram realizados através dos pacotes Seismic Unix¹, (COHEN e STOCKWELL, 2010) e Seismic Lab² (SACCHI, 2008) através do software Matlab versão 2008.

Os pulsos utilizados na construção dos traços sintéticos são mostradas na Figura 4.1 para os casos de fase mínima, mista e máxima.

Figura 4. 1: Formas de onda utilizadas na construção dos traços sintéticos avaliados e seus respectivos zeros em termos da transformada Z.

1 - <http://www.cwp.mines.edu/cwpcodes/> - acessado em 07/07/2010

2 - <http://seismic-lab.physics.ualberta.ca/index.html> - acessado em 07/07/2010

4.1 CASO DETERMINÍSTICO

4.1.1 EXTRAÇÃO DO PULSO SÍSMICO

Nestes testes foram simulados os efeitos da utilização da matriz identidade e da matriz (2.11) na regularização da equação de mínimos quadrados (2.9). Foi utilizada a forma de onda de fase zero que foi convolvida com uma resposta impulsiva de 500 amostras gerada de forma aleatória, possuindo dez impulsos. Ao traço gerado foi adicionado ruído gaussiano aleatório deixando este com razão sinal/ruído 20. Na Figura 4.2 é mostrado um exemplo de traço sintético utilizado.

Figura 4. 2: Exemplo de traço sintético utilizado nos testes de estimativa da forma de onda.

Na equação (2.9) o objetivo é obter uma solução com um resíduo mínimo e ao mesmo tempo uma solução de norma mínima, minimizando a influência do ruído presente no dado. Entretanto, a escolha do peso da regularização μ não pôde ser realizada através da utilização de critérios como o da curva L, onde é visualizada a norma do resíduo da solução pelos valores da norma da solução, já que no gráfico construído desta forma não foi obtida uma curva do tipo L. Os melhores resultados foram obtidos identificando o valor de μ que minimiza apenas a norma da solução. A busca por este valor foi realizada por um algoritmo de busca direta encontrada na função *fminbnd*¹ do software Matlab.

Nos testes a seguir a estimativa foi realizada 100 vezes, sendo que para cada estimativa foi adicionado um ruído de mesmo nível, porém diferente, no traço sintético.

Na Figura 4.3 foi utilizada a matriz identidade no lugar da matriz D da equação (2.9).

¹ <http://www.mathworks.com/help/techdoc/ref/fminbnd.html> - acessado em 07/07/2010

Neste caso o problema apresenta estabilidade, mas a saída apresenta uma pequena rugosidade quando comparada a forma de onda original. Isto leva a crer que o critério de regularização através de (2.11) é mais adequado na resolução do problema.

Figura 4. 3: Estimativa do pulso por mínimos quadrados realizada 100 vezes com diferentes ruídos gaussianos aleatórios de mesmo nível, regularizada com a matriz identidade.

A diferença entre o resultado da figura 4.3 e o obtido na figura 4.4 quando a matriz (2.11) é utilizada na regularização é pequena. Entretanto este último possui menor rugosidade, se aproximando com melhor precisão do resultado desejado. As formas de onda presentes em traços sísmicos reais também apresentam um caráter suave favorecendo também a solução da Figura 4.4.

Figura 4. 4: Estimativa do pulso por mínimos quadrados realizada 100 vezes com diferentes ruídos gaussianos aleatórios de mesmo nível, regularizada com a matriz (2.11).

4.1.2 DECONVOLUÇÃO DETERMINÍSTICA

Aqui as três metodologias foram testadas sobre as formas de onda de diferentes fases. Os testes iniciais foram sobre a compressão de uma única forma de onda em um impulso. Novamente foi adicionado ruído gaussiano aleatório aos dados, a razão sinal/ruído utilizada foi 40. A escolha do peso do parâmetro de regularização foi realizada de forma semelhante a estimativa da forma de onda por mínimos quadrados para as técnicas de Cauchy e de Gold. A diferença é que foi utilizado o kurtosis como norma da eficácia da deconvolução.

Na Figura 4.5 é mostrado o resultado da compressão das formas de onda de diferentes fases. Neste caso, todos os métodos obtiveram bons resultados, não apenas para a fase mínima que é um caso bem comportado em termos de deconvolução.

Figura 4. 5: Resultado da compressão dos pulsos de fase mínima, mista e máxima pelos diferentes métodos de deconvolução estudados.

Os mesmos testes foram repetidos para uma resposta impulsiva que possui ao mesmo tempo impulsos isolados e impulsos muito próximos.

Figura 4. 6: Resposta impulsiva obtida com os métodos Cauchy, Gold e redes neurais para o sismograma sintético construído com a forma de onda de fase mínima, sendo os pontos em vermelho a resposta desejada e linha em azul a resposta estimada.

Figura 4. 7: Resposta impulsiva obtida com os métodos Cauchy, Gold e redes neurais para o sismograma sintético construído com a forma de onda de fase mista, sendo os pontos em vermelho a resposta desejada e linha em azul a resposta estimada.

Figura 4. 8: Resposta impulsiva obtida com os métodos Cauchy, Gold e redes neurais para o sismograma sintético construído com a forma de onda de fase máxima, sendo os pontos em vermelho a resposta desejada e linha em azul a resposta estimada.

Os resultados obtidos nas figuras 4.6, 4.7 e 4.8 são semelhantes independentemente da fase da forma de onda presente no traço sísmico. Uma característica geral observada é que quando algum dos métodos não consegue resolver dois impulsos próximos, pode aparecer um impulso intermediário entre os dois.

Os melhores resultados foram obtidos com os algoritmos de deconvolução de Cauchy e de Gold que conseguiram resolver melhor os impulsos mais próximos do que o método que utiliza as redes neurais. Entretanto, a utilização de ambos os métodos requer a escolha de um peso para a regularização do problema. Isto requer um tempo maior de processamento para os dois métodos.

Nas redes neurais, quando a forma de onda é conhecida, os parâmetros mais subjetivos de escolha são a menor amplitude dos impulsos presentes no traço e o intervalo de amplitudes

que devem ser buscados. Na deconvolução por redes neurais, quando a forma de onda é estimada, ainda pode ser necessário definir a amplitude onde será iniciada a busca, isto porque alguns métodos de estimativa do pulso sísmico obtêm um resultado válido a menos de uma constante.

4.2 CASO CEGO

4.2.1 DECONVOLUÇÃO POR MÍNIMA ENTROPIA COM RESTRIÇÕES NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA

Nesta etapa os dados sintéticos foram os mesmos que os utilizados na etapa de deconvolução determinística.

A figura 4.9 mostra os sinais utilizados no primeiro teste e seus respectivos espectros de amplitude. O objetivo do algoritmo é recuperar a informação espectral da resposta impulsiva, esta informação é suprimida após a convolução entre o pulso sísmico e a resposta impulsiva.

Figura 4. 9: Resposta impulsiva, forma de onda e traço sintético construído com os dois anteriores após a adição de ruído, na coluna da direita são mostrados seus respectivos espectros de amplitude.

Para avaliar o algoritmo, foi realizado um teste comparativo entre a deconvolução usando o kurtosis como norma, a norma logarítmica e a norma logarítmica com as restrições no domínio da frequência, para o dado observado na figura 4.9. Em todos os casos foi

utilizado o mesmo comprimento de filtro e o resultado pode ser visualizado nas figuras 4.10, 4.11 e 4.12.

Nestas figuras, o resultado obtido com o kurtosis como norma proporciona grande compactação do pulso sísmico, recuperando grande parte da informação espectral. Entretanto, a resolução inicial da resposta impulsiva não foi recuperada. Uma forma de tentar melhorar esta resolução é aumentar o comprimento do filtro ou o número de iterações do algoritmo, o que pode resultar na perda dos impulsos mais fracos.

Quando a norma logarítmica é utilizada (Figura 4.11), não há uma convergência tão rápida do algoritmo e se faz necessário um número maior de iterações para que seja obtido um resultado semelhante ao do kurtosis. Deve ser notado que a informação espectral recuperada também é menor. Este é o resultado que seria obtido se apenas a primeira etapa do algoritmo de FMED fosse utilizada.

Para a segunda etapa do algoritmo, foi recuperada a informação antes da frequência 0.2 e depois da frequência 300 Hz. Quando a segunda etapa é aplicada há uma compactação maior dos impulsos e aumento da informação no domínio da frequência.

Figura 4. 10: Resultado da deconvolução por mínima entropia e espectro de amplitude do resultado utilizando o kurtosis como norma.

Figura 4. 11: Resultado da deconvolução por mínima entropia e espectro de amplitude do resultado utilizando a norma logarítmica.

Figura 4. 12: Resultado da deconvolução por mínima entropia com restrições no domínio da frequência com o pulso de fase mínima da figura 4.1.

É importante a avaliação de traços com pulsos de fases diferentes da mínima. Nas figuras 4.13 e 4.14 são mostrados os resultados equivalentes da figura 4.12 para os traços gerados com os pulsos de fase mista e máxima da figura 4.1.

Figura 4. 13: Resultado da deconvolução por mínima entropia com restrições no domínio da frequência com o pulso de fase mista da figura 4.1.

Figura 4. 14: Resultado da deconvolução por mínima entropia com restrições no domínio da frequência com o pulso de fase máxima da figura 4.1.

Em todos os resultados obtidos foi percebido um atraso constante na resposta impulsiva estimada, os impulsos ocorrem de acordo com o máximo do pulso contido no traço. Para corrigir este problema foi realizada a correlação cruzada da resposta impulsiva estimada com a resposta impulsiva conhecida.

4.2.2 ROTAÇÃO POR FASE CONSTANTE

A primeira motivação para a aplicação da metodologia seria através da rotação obter um pulso de fase zero que consequentemente teria maior amplitude e menor comprimento. Entretanto, nos testes realizados com o método não foi observada uma compactação do pulso. Na figura 4.15 é apresentado um caso onde a forma de onda presente no traço sísmico possui fase mínima. Pode ser observado que, apesar da rotação, as formas de onda praticamente não são compactadas. Por isso no trabalho de Levy e Oldenburg (1987) e no trabalho de Van der Baan e Pham (2008) esta técnica é aplicada em conjunto com a divisão do espectro de amplitude ou a deconvolução de Wiener.

Neste trabalho não é assumida aleatoriedade para a resposta impulsiva. Portanto não será aplicada a deconvolução de Wiener e também não será realizada estimativa do espectro de amplitude do pulso, para posterior remoção. O método foi aplicado com o objetivo de corrigir possíveis diferenças de fase da reflexão devido à distância fonte-receptor.

Figura 4. 15: Exemplo de aplicação do algoritmo de rotação do traço sísmico visando o aumento do kurtosis do traço, (a) mostra o traço antes da aplicação do algoritmo e (b) após a aplicação.

No exemplo da figura 4.15, as formas de onda do traço rotacionado se aproximam da fase zero, entretanto o traço sintético utilizado possui quatro reflexões e as duas últimas reflexões não puderam ser separadas devido à proximidade.

Para testar melhor este procedimento, foi construído um sismograma sintético com três reflexões, onde o traço possui formas de onda de fase zero, os traços seguintes foram gerados pela rotação do primeiro traço, através de (3.26), aumentando a rotação em 10° de traço para traço. Após a aplicação das rotações foi adicionado ruído aleatório aos traços.

Na figura 4.16, após a aplicação do algoritmo de rotação, pode ser observado que as reflexões possuem aproximadamente a mesma fase. Isto faz com que a amplitude máxima de cada pulso coincida quando se trata dos mesmos eventos.

Figura 4. 16: Exemplo da aplicação da rotação do traço sísmico com a maximização do kurtosis, para 10 traços com formas de onda de diferentes fases, com o sismograma original antes da aplicação e após a aplicação do algoritmo.

4.2.3 ESTIMATIVA HOMOMÓRFICA

Um ponto importante da obtenção do cepstro complexo do sinal é a restauração de sua fase. O espectro de fase do traço $x(t)$ pode ser estimado por $ARG[X(f)] = \arctan\left(\frac{Im\{X(f)\}}{Re\{X(f)\}}\right)$.

Este valor está limitado à faixa $(-\pi, \pi)$ e o processo de restauração visa evitar descontinuidades nestes pontos extremos. Neste trabalho será utilizada a função `cceps` do Matlab que trabalha removendo estas descontinuidades através da aplicação de um termo de fase linear. No trabalho de Herrera e van der Baan (2011) foi realizado um estudo comparativo e este método foi um dos que mostrou melhor desempenho.

Para avaliar a metodologia de Otis e Smith (1977) (seção 3.3, equações 3.30 e 3.31), foram construídas as respostas impulsivas de um conjunto de traços simulando um conjunto de ponto médio comum (CMP). A figura 4.17 mostra esta resposta impulsiva e, como um exemplo, o resultado da sua convolução com o pulso de fase mista da figura 4.1.

Figura 4. 17: (a) Resposta impulsiva gerada para testes sintéticos; (b) resultado da sua convolução com o pulso de fase mista da figura 4.1.

Com isto foi calculada a média dos traços no cepstro complexo e este foi trazido novamente para o domínio do tempo, para os casos com pulsos de fase mínima, mista e máxima. O resultado pode ser visualizado na figura 4.18.

Figura 4. 18: Estimativa do pulso presente em um conjunto CMP formado pela convolução da resposta impulsiva da figura 4.17 com pulsos de diferentes fases. Os itens (a), (b) e (c) representam as estimativas para os casos de fase mínima, mista e máxima respectivamente.

O resultado encontrado pode ser tratado através da aplicação de um filtro passa-banda no domínio da frequência. No cepstro complexo também pode ser aplicado um filtro passa-baixa para minimizar a influência tanto do ruído quanto de resíduos de uma estimativa aproximada da resposta impulsiva.

4.2.4 IDENTIFICAÇÃO POR RELAÇÃO CRUZADA

Para o primeiro teste foram utilizadas duas formas de onda de fases diferentes convolvidas com a mesma resposta impulsiva. O primeiro traço foi obtido através da convolução da forma de onda de fase mínima e o segundo obtido pela convolução da forma de onda de fase mista da figura 4.1. O objetivo foi simular a possibilidade da utilização da metodologia com duas fontes diferentes: marreta e compactador.

Ambas as formas de onda possuem o comprimento de 40 amostras e esta informação foi utilizada para o primeiro teste. A razão sinal/ruído também foi de 40 e os resultados obtidos para este teste podem ser visualizados na figura 4.19.

Figura 4. 19: Estimativa da forma de onda de fase mínima (a) e mista (b) contidas em dois traços diferentes com mesma resposta impulsiva.

Com isto foi avaliado o procedimento de estimativa quando o comprimento dos pulsos é desconhecido. Desta forma foi comparado o resultado da estimativa de comprimento utilizando o kurtosis e a norma logarítmica. O valor das normas foi calculado sobre o traço

deconvolvido utilizando o pulso de fase mínima estimado. O método de deconvolução foi a deconvolução regularizada por Cauchy e os resultados estão expressos na figura 4.20.

Figura 4. 20: Valor das normas kurtosis (a) e norma logarítmica (b) para o traço deconvolvido pela deconvolução regularizada por Cauchy com o pulso estimado para o primeiro traço.

Em ambos os casos pode ser notado um pico para o comprimento correto. Entretanto para o kurtosis foram obtidos valores mais altos para comprimentos maiores. Embora o valor de comprimento possa ser delimitado visualmente no sismograma foi adotada a norma logarítmica como critério de medida de comprimento, para maior certeza na escolha.

O resultado da deconvolução para o comprimento da estimativa pode ser observado na figura 4.21. Nesta deve ser notado que o resultado foi inferior ao caso determinístico, onde foi utilizada a mesma resposta impulsiva, devido ao desvio na estimativa das formas de onda que pode ser percebido na figura 4.19.

Figura 4. 21: Resultado da deconvolução do traço da deconvolução regularizada por Cauchy pelo pulso estimado pelo método de relação cruzada.

Para estudar a metodologia proposta em Spadini e Diogo (2011), foi utilizado o traço construído com a *wavelet* de fase mínima da figura 4.1. A partir deste traço foi construído um segundo traço através da aplicação de um filtro.

Para verificar a *wavelet* produzida no segundo traço na figura 4.22 são mostrados os zeros da *wavelet* conhecida para o primeiro traço e os zeros da *wavelet* resultante da convolução da *wavelet* de fase mínima conhecida, com o filtro aplicado para a produção do segundo traço, mostrando que em alguns casos esta metodologia permite a construção de uma *wavelet* que não possua zeros comuns com a primeira.

Figura 4. 22: Zeros da *wavelet* de fase mínima da figura (4.1) (pulso 1); e zeros desta mesma *wavelet* após a aplicação de um filtro (pulso 2).

Com isto foi possível realizar a estimativa da *wavelet* de fase mínima com resultado expresso na figura 4.23.

Figura 4. 23: Estimativa da forma de onda de fase mínima (a) e mista (b) contidas em dois traços diferentes porém com mesma resposta impulsiva.

5 APLICAÇÃO A DADOS REAIS

Os dados reais avaliados foram coletados em diferentes locais. Foi estudada a aplicação dos métodos de deconvolução sobre conjuntos de tiro adquiridos em atividades didáticas na Praça do Relógio no campus principal da Universidade de São Paulo, na estrutura de Colônia em São Paulo-SP (RICCOMINI et al., 2011) e sobre os dados de um levantamento CMP (MENDES, 2011) adquirido também no campus principal da Universidade de São Paulo, no terreno do Instituto de Física em frente ao prédio do IAG, no local em que existem três poços perfurados para estudos geofísicos (PORSANI et al., 2004).

Na aquisição realizada na Praça do Relógio foram utilizados três tipos de fontes diferentes, marreta, rifle e compactador de solo (este último com a técnica Mini-Sosie), representando dados de mesmo local com pulsos diferentes. O conjunto de tiro de Colônia, adquirido com fonte compactador, possui três eventos facilmente identificáveis. Isto é importante na avaliação dos métodos cegos de deconvolução, que não utilizam a aleatoriedade da resposta impulsiva como premissa.

Os dados do levantamento CMP foram escolhidos para verificar o efeito da deconvolução na qualidade do empilhamento e neste caso em particular para avaliar a identificação correta dos tempos de chegada das reflexões. Esses dados foram adquiridos em uma janela de afastamentos acima do ângulo crítico de incidência e, portanto, apresentam defasagem na forma do pulso, o que torna difícil a adoção de um critério para a tomada dos tempos de reflexão na interface para posterior conversão tempo-profundidade.

5.1 DECONVOLUÇÃO DETERMINÍSTICA

No primeiro teste deste tópico foi utilizado o conjunto de tiro adquirido com a técnica Mini-Sosie na praça do relógio. Desta forma foi possível utilizar a autocorrelação do traço adquirido próximo à fonte (traço piloto) como a forma de onda contida no traço sísmico, que corresponde ao intervalo delimitado pelas linhas verticais no sinal apresentado na figura 5.1.

Figura 5. 1: Traço piloto obtido através da autocorrelação do sinal medido por um geofone próximo a fonte, as linhas pretas delimitam o pulso utilizado como entrada nos algoritmos de deconvolução.

Na figura 5.2 (a) é mostrado o sismograma original após aplicação de ganho de balanceamento e filtragem do espectro de amplitude para melhor visualização. Nesta é possível observar apenas um evento de reflexão. Os eventos indesejáveis, como o *ground-roll* e as primeiras chegadas, foram apagados do dado e o sismograma foi utilizado apenas a partir do traço 40, o resultado pode ser observado na figura 5.2 (b).

Figura 5. 2: Conjunto de tiro adquirido com a técnica Mini-Sosie (a) e o intervalo delimitado para utilização nos algoritmos de deconvolução (b), onde o traço 1 equivale ao afastamento 40 metros.

Com isto os métodos determinísticos de deconvolução foram aplicados sobre o sismograma da figura 5.2 (b), cujos resultados são apresentados nas figuras 5.3 (a), 5.4 (a) e 5.5 (a), respectivamente para os métodos de Cauchy, de Gold e por redes neurais. Para a

verificação da coerência da resposta da deconvolução, o resultado obtido foi convolvido com o pulso utilizado na deconvolução, os sismogramas assim obtidos são mostrados nas figuras 5.3b, 5.4b e 5.5b.

Embora as respostas impulsivas obtidas da deconvolução com os três métodos tenham se mostrado diferentes (figuras 5.3 (a), 5.4 (a) e 5.5 (a)), todos os sismogramas obtidos após a convolução entre a resposta impulsiva estimada e a forma de onda extraída da autocorrelação do traço piloto (figuras 5.3 (b), 5.4 (b) e 5.5 (b)) mostram semelhança com o sismograma utilizado como entrada nos algoritmos.

Figura 5. 3: Resultado da deconvolução com o algoritmo deconvolução regularizado por Cauchy (a) e o resultado da convolução de (a) com o pulso medido (figura 5.1) (b).

Figura 5. 4: Resultado da deconvolução com o algoritmo de deconvolução de Gold (a) e o resultado da convolução de (a) com o pulso medido (figura 5.1) (b).

Figura 5. 5: Resultado da deconvolução com o algoritmo deconvolução por redes neurais (a) e o resultado da convolução de (a) com o pulso medido (figura 5.1) (b).

O resultado obtido com Cauchy (figura 5.3) mostra apenas um impulso por traço, o que pode ser resultado da utilização do kurtosis como critério de medida para uma boa resposta.

No caso da deconvolução de Gold (figura 5.4), apesar de também ter sido utilizado o kurtosis, poderiam ser interpretadas duas reflexões. Um detalhe importante sobre o resultado obtido com Gold foi a instabilidade do algoritmo para alguns traços, os quais foram zerados por apresentarem eventos que se mostraram incoerentes e de amplitude muito maior que a dos pulsos dos outros traços.

Para a deconvolução por redes neurais não houve uma redução do ruído como nos outros dois métodos, o ruído que foi mantido no dado após o processamento está em um nível muito próximo do sinal. Para essa técnica, a alternativa seria limitar a busca pelas amplitudes até um determinado valor. Vale lembrar também que nos resultados sintéticos, o método das redes neurais apresentou um menor poder de resolução quando comparado aos outros dois métodos.

Após a obtenção destes resultados foi realizada uma avaliação da estimativa da forma de onda de cada traço do mesmo sismograma. O método de mínimos quadrados foi avaliado, utilizando a resposta impulsiva obtida pelos algoritmos de Cauchy, Gold e redes neurais como entrada. A *wavelet* encontrada foi convolvida com a respectiva resposta impulsiva de entrada para comparação. Os resultados estão expressos nas figuras 5.6, 5.7 e 5.8. O sismograma estimado tende a ser mais próximo do sismograma original. Entretanto, erros na resposta impulsiva de entrada irão afetar a estimativa da forma de onda.

Para avaliar melhor os resultados foi realizada uma medida de correlação entre os traços dos sismogramas estimados e os traços dos sismogramas originais. O resultado obtido com a deconvolução por Cauchy e estimativa por mínimos quadrados pode ser observado na figura 5.9. O sismograma gerado através da convolução da resposta impulsiva estimada por Cauchy com a forma de onda estimada individualmente para cada traço (pontos em vermelho) mostra uma correlação maior do que o sismograma obtido da convolução com a forma de onda extraída do traço piloto (pontos em azul). A figura 5.10 mostra apenas a curva azul da figura 5.9, para que seja mais bem visualizada a dependência entre o sismograma estimado após a deconvolução.

Figura 5. 6: Resultado da estimativa do pulso de cada traço utilizando a resposta impulsiva estimada por Cauchy (a) e resultado da convolução entre a resposta impulsiva e os pulsos estimados (b).

Figura 5. 7: Resultado da estimativa do pulso de cada traço utilizando a resposta impulsiva estimada pela deconvolução de Gold (a) e resultado da convolução entre a resposta impulsiva e os pulsos estimados (b).

Figura 5. 8: Resultado da estimativa do pulso de cada traço utilizando a resposta impulsiva estimada pelas redes neurais (a) e resultado da convolução entre a resposta impulsiva e os pulsos estimados (b).

Figura 5. 9: Correlação entre o sismograma original e os sismogramas estimados pela: convolução da resposta obtida com o algoritmo de deconvolução regularizado por Cauchy com a forma de onda obtida da autocorrelação do traço piloto (pontos em azul); e convolução entre a resposta impulsiva estimada por Cauchy e o pulso estimado utilizando como base a mesma resposta impulsiva (pontos em vermelho).

Figura 5. 10: Correlação entre o sismograma original e o sismograma estimado pela convolução da resposta obtida com o algoritmo de deconvolução regularizado por Cauchy com o traço piloto.

O mesmo tipo de análise, expressa na figura 5.9 é apresentada nas figuras 5.11 e 5.12. Nestas duas últimas também é possível observar uma correlação maior entre os sismogramas gerados com as diferentes *wavelets*, pontos em vermelho. A maior correlação é observada através da menor dispersão dos pontos em vermelho. Sendo que, após a estimativa do pulso para cada traço, o sismograma estimado mostra melhor coerência com o sismograma original.

Figura 5. 11: Correlação entre o sismograma original e os sismogramas estimados pela: convolução da resposta obtida com o algoritmo de deconvolução regularizado por Gold com a forma de onda obtida da autocorrelação do traço piloto (pontos em azul); e convolução entre a resposta impulsiva estimada por Gold e o pulso estimado utilizando como base a mesma resposta impulsiva (pontos em vermelho).

Figura 5. 12: Correlação entre o sismograma original e os sismogramas estimados pela: convolução da resposta obtida com o algoritmo de deconvolução regularizado por redes neurais com a forma de onda obtida da autocorrelação do traço piloto (pontos em azul); e convolução entre a resposta impulsiva estimada por redes neurais e o pulso estimado utilizando como base a mesma resposta impulsiva (pontos em vermelho).

A seguir foi avaliado o conjunto de tiro adquirido em Colônia. Na figura 5.13 pode ser observado o pulso estimado para este conjunto de tiro. Na figura 5.14 (a) é mostrado o

conjunto de tiro de Colônia após a aplicação de ganho de balanceamento, filtragem do espectro de amplitude e filtragem f-k para melhor visualização. Nas figuras 5.14 (b), (c) e (d) são mostrados respectivamente os resultados da aplicação dos métodos de Cauchy, Gold e redes neurais.

Figura 5. 13: Autocorrelação do traço piloto medido por um geofone próximo a fonte, para o conjunto de tiro de Colônia.

Figura 5. 14: Conjunto de tiro de Colônia adquirido com a técnica Mini-Sosie (a); e resultado da sua deconvolução pelos métodos de: Cauchy (b); Gold (c); e redes neurais (d).

Para os resultados por Cauchy houve uma pequena compactação dos pulsos contidos nos traços e diminuição do ruído. Para maior compactação dos pulsos se faz necessária à

utilização de valores mais altos para o parâmetro de regularização. Entretanto, isto faz com que ocorra perda de informação, isto é, nem todas as reflexões são observadas.

Os resultados obtidos por Gold e pelas redes neurais se mostraram mais suscetíveis à presença de ruído. Entretanto, pela maior quantidade de traços é possível observar uma continuidade maior dos eventos de reflexão. Apesar das respostas mostrarem coerência com o sismograma original, esses dois métodos não se mostraram adequados. Era esperado que após a deconvolução os sismogramas fossem reduzidos aos eventos de reflexão minimizando a presença do ruído.

Em seguida, os mesmos procedimentos foram aplicados para um conjunto CMP da aquisição realizada no terreno do Instituto de Física. Os traços piloto utilizados na deconvolução deste conjunto na figura 5.15 e o conjunto CMP considerado pode ser visualizado na figura 5.16 (a) seguido pelos resultados da deconvolução nas figuras 5.16 (b), 5.16 (c) e 5.16 (d) respectivamente para os métodos de Cauchy, de Gold e por redes neurais. Os resultados para este conjunto CMP mostram uma correlação menor com o sismograma original do que os obtidos para os conjuntos de tiro testados previamente.

Figura 5. 15: Traços piloto referentes a cada tiro presente no conjunto CMP (b).

Figura 5.16: Conjunto CMP adquirido com a técnica Mini-Sosie no terreno do IF-USP (a); e resultado da sua deconvolução pelos métodos de: Cauchy (b); Gold (c); e redes neurais (d).

Por se tratar de um conjunto CMP, é possível avaliar o empilhamento dos traços após a correção de *normal moveout* (NMO). Para isto foi construído o painel semblance dos sismogramas observados nas figuras 5.16 (a) - (d). Os resultados, expressos na figura 5.17,

mostram que no eixo do tempo as regiões que contém os valores máximos da função Semblance ficaram mais compactas no eixo do tempo para todos os métodos. Porém houve um aumento na incerteza de qual velocidade deve ser escolhida. Embora nos painéis para os métodos de Gold e redes neurais estejam presentes alguns pontos de máximos mais compactos, estes são favorecidos por picos que apresentam amplitude discrepante dos demais.

Figura 5. 17: Pannel semblance: do sismograma (a); da resposta impulsiva obtida por Cauchy (b); da resposta impulsiva obtida por Gold (c); da resposta impulsiva obtida por redes neurais (d).

Em função das análises realizadas e levando em consideração a redução de ruído, compactação dos pulsos nos traços e qualidade do empilhamento indicada pela medida da função Semblance, o método de Cauchy foi adotado como o método determinístico de deconvolução para utilização em conjunto com os métodos que realizam apenas a estimava do pulso.

Com isto foi avaliada a deconvolução de Cauchy aplicada após o empilhamento dos dados. A velocidade utilizada na correção NMO foi de 1700 m/s, o mesmo valor interpretado por Mendes (2011). A seção empilhada obtida pode ser visualizada na figura 5.18.

Figura 5. 18: Seção empilhada dos dados CMP adquiridos no terreno do IF-USP.

O pulso utilizado para a deconvolução da seção foi construído a partir da soma dos pulsos gerados da autocorrelação dos traços piloto adquiridos em cada tiro realizado na aquisição.

Na figura 5.19 o resultado da aplicação do método de Cauchy apresenta qualidade semelhante aos anteriores obtidos com o mesmo método.

Figura 5. 19: Resultado da deconvolução pelo método de Cauchy da seção empilhada (figura 5.18).

5.2 CASO CEGO

5.2.1 DECONVOLUÇÃO POR MÍNIMA ENTROPIA COM RESTRIÇÕES NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA

Seguindo a mesma ordem de apresentação dos resultados do caso determinístico, nas figuras 5.20, 5.21 e 5.22 são mostrados os resultados para o método sobre os conjuntos de tiro adquiridos na praça do relógio da USP, respectivamente com as fontes compactador, rifle e marreta. Nestas não são observadas diferenças nos resultados que poderiam ter sido causadas por diferenças na forma do pulso característico de cada fonte. As diferenças encontradas foram relativas ao ruído presente nos sismogramas. Entretanto é importante notar que a forma do pulso influencia na posição dos impulsos das respostas impulsivas estimadas, estes estão relacionados com os pontos máximos dos pulsos.

Figura 5. 20: Conjunto de tiro obtido com a técnica Mini-Sosie com um compactador de solo na praça do relógio da USP (a) e a resposta impulsiva estimada pela deconvolução por mínima entropia com restrições na frequência.

Figura 5.21: Conjunto de tiro obtido com a fonte rifle solo na praça do relógio da USP (a) e a resposta impulsiva estimada pela deconvolução por mínima entropia com restrições na frequência (b).

Figura 5.22: Conjunto de tiro obtido com a fonte marreta na praça do relógio da USP (a) e a resposta impulsiva estimada pela deconvolução por mínima entropia com restrições na frequência (b).

Aqui novamente foi avaliado o conjunto de tiro adquirido em Colônia. Na figura 5.23 são mostrados os resultados da primeira e segunda etapa do algoritmo e na figura 5.24 a informação espectral recuperada. Os resultados das figuras 5.23 e 5.24 mostram a resposta esperada quando comparados com os testes sintéticos. A resposta impulsiva obtida se assemelha a estimada com o método de Cauchy do caso determinístico (figura 5.14 (b)).

Figura 5. 23: Resultado da deconvolução do conjunto de tiro de Colônia (sismograma original na figura 5.14 (a)): pelo algoritmo de deconvolução por mínima entropia com restrições na frequência: primeira etapa (a) e segunda etapa (b).

Figura 5. 24: Espectros de amplitude: sismograma original (a); após a aplicação da primeira etapa da deconvolução por mínima entropia com restrições na frequência (b); após a aplicação da segunda etapa (c).

O teste seguinte foi quanto ao mesmo conjunto CMP utilizado para avaliar os métodos determinísticos. Na figura 5.25 (b) é mostrado o resultado da deconvolução por mínima entropia com restrições na frequência.

Na figura 5.26, é apresentado o painel Semblance para os sismogramas acima (figura 5.25). De forma semelhante aos resultados para a deconvolução determinística (Figura 5.17) houve uma melhora de resolução temporal sem diminuir a incerteza de qual velocidade deve ser escolhida.

Figura 5. 25: Conjunto CMP obtido com a técnica Mini-Sosie (a) e a resposta impulsiva estimada pela deconvolução por mínima entropia com restrições na frequência (b).

Figura 5. 26: Paineis semblance dos conjuntos CMP da figura 5.25.

Por fim, na figura 5.27 é mostrado o resultado da deconvolução da seção sísmica após o empilhamento.

Figura 5. 27: Resultado da deconvolução da seção empilhada pelo método de deconvolução por mínima entropia com restrições na frequência da seção empilhada da figura 5.18.

Neste caso também foi observada perda de continuidade ao final da seção onde o pulso é pior definido. Entretanto os resultados foram melhores do que aqueles obtidos no caso determinístico (figura 5.19), onde foi utilizada uma única *wavelet* para a deconvolução da seção inteira.

5.2.2 ROTAÇÃO POR FASE CONSTANTE

O método de rotação por fase constante foi aplicado nos dados reais com o intuito de corrigir a defasagem que ocorre em reflexões que estão além do ângulo crítico e assim levar os pulsos de todos os traços para uma fase próxima para que possa ser construído um filtro comum a toda seção. Como um subproduto, também foi avaliada a possibilidade de adoção de um critério comum da tomada dos tempos de reflexão. Como não foi observada grande mudança na forma do pulso dentro da janela de afastamentos escolhida para a realização do levantamento CMP, esta metodologia foi aplicada apenas nos dados da seção empilhada (figura 5.18) e o resultado dos dados rotacionados são apresentados na figura 5.28.

Figura 5. 28: Dados da figura 5.18 rotacionados pelo método de rotação por fase constante.

Considerando que a *wavelet* original produzida com a técnica Mini-Sosie é de fase zero, após a rotação do pulso o ponto de máximo da *wavelet* correspondente a reflexão observada deve estar próximo ao ponto de máximo do envelope. Assim, foi realizada uma avaliação dos pontos de máximo de cada traço antes e após a rotação (figura 5.29). Para isto foi utilizado até o traço 116 das seções sísmicas, pois, após este ocorrem valores de amplitude maiores que o evento de reflexão avaliado.

Figura 5. 29: Máximos: do envelope do sismograma original (linha azul); do sismograma original (linha verde); e do sismograma rotacionado (pontos em vermelho).

Na figura 5.29 o máximo do sismograma rotacionado não mostra uma tendência próxima do máximo do envelope e estes pontos de máximo mostram uma série de descontinuidades. Por este motivo a metodologia deve ser aplicada com critério, a parte inicial da seção, que mostra uma tendência aleatória de correção, apresenta um efeito visual de estática após a rotação do sismograma. Segundo Levy e Oldenburg (1987) o método não é preciso para medir rotações pequenas em fase, entretanto para a parte final da seção que apresenta mais distorções o método se mostrou eficaz. A seção rotacionada será avaliada também na seção seguinte em conjunto com a estimativa homomórfica.

5.2.3 ESTIMATIVA HOMOMÓRFICA

No primeiro teste com esta metodologia foi realizada a estimativa do pulso sobre os conjuntos de tiro adquiridos na praça do relógio da USP. Nas figuras 5.30, 5.31 e 5.32 são mostrados os resultados das estimativas dos pulsos juntamente com o resultado de sua aplicação na deconvolução por Cauchy.

Figura 5. 30: Resultado da estimativa do pulso no conjunto de tiro adquirido com a técnica Mini-Sosie na praça do relógio da USP pelo método homomórfico (a); e resultado da sua aplicação na deconvolução deste conjunto de tiro pelo método de Cauchy (b).

Figura 5. 31: Resultado da estimativa do pulso no conjunto de tiro adquirido com um rifle na praça do relógio da USP pelo método homomórfico (a); e resultado da sua aplicação na deconvolução deste conjunto de tiro pelo método de Cauchy (b).

Figura 5. 32: Resultado da estimativa do pulso no conjunto de tiro adquirido com uma marreta na praça do relógio da USP pelo método homomórfico (a); e resultado da sua aplicação na deconvolução deste conjunto de tiro pelo método de Cauchy (b).

Em geral foram obtidos bons resultados na deconvolução para as fontes Mini-Sosie e marreta (figuras 5.31 e 5.33). Já o resultado para a fonte rifle apresentou inconvenientes, não há coerência da polaridade dos impulsos entre todos os traços (figura 5.32).

As formas de onda estimadas para as fontes rifle e marreta, ambas impulsivas, foram pulsos parecidos (figuras 5.32 (a) e 5.33 (a)).

Para o próximo teste foi realizada a estimativa do pulso do conjunto de tiro de Colônia. Na figura 5.33 é mostrado este resultado. Quando comparada ao pulso medido próximo à fonte este apresenta um desvio mesmo sendo aplicada filtragem do cepstro para eliminar resíduos da resposta impulsiva, talvez pela utilização de um número pequeno de traços.

Figura 5. 33: Resultado da estimativa do pulso no conjunto de tiro adquirido com a técnica Mini-Sosie em Colônia pelo método homomórfico (a); e resultado da sua aplicação na deconvolução deste conjunto de tiro pelo método de Cauchy (b).

O resultado da figura 5.33 se mostra coerente com o sismograma e com a resposta impulsiva estimada pelos outros métodos. Alguns resíduos são observados, provavelmente pelo desvio na estimativa do pulso.

A seguir foi realizada a deconvolução da seção empilhada (figura 5.18). Como o método homomórfico precisa de certa quantidade de traços para realizar a estimativa de um

único pulso, a estimativa foi realizada em cada conjunto CMP para posterior aplicação na deconvolução da seção empilhada. O resultado pode ser observado na figura 5.34.

Figura 5. 34: Resultado da deconvolução da seção (figura 5.18), com as *wavelets* estimadas pelo método homomórfico nos seus respectivos conjuntos CMP.

O resultado obtido foi inferior ao esperado. Acredita-se que a quantidade reduzida de traços em determinados conjuntos CMP tenha tido influência na estimativa das *wavelets*. Como comparação na figura 5.35 é mostrado o sismograma da seção empilhada após a deconvolução através de um único pulso estimado para toda a seção.

Figura 5. 35: Resultado da deconvolução da seção (figura 5.18), com o pulso estimado pelo método homomórfico em toda a seção.

Por fim na figura 5.36 é mostrado o sismograma da seção empilhada após a deconvolução através de um único pulso estimado para toda a seção rotacionada.

Figura 5. 36: Resultado da deconvolução da seção empilhada após a rotação, com o pulso estimado pelo método homomórfico em toda a seção após a rotação.

5.2.4 ESTIMATIVA POR RELAÇÃO CRUZADA

O primeiro teste desta metodologia foi realizado sobre os conjuntos de tiro da praça do relógio. Não foram obtidos bons resultados através da utilização de conjuntos de tiro adquiridos com duas fontes diferentes. Assim, aqui será estudada a opção de construção da segunda resposta impulsiva através da aplicação de um filtro sobre o sismograma original como descrito na seção 3.4.

Nas figuras 5.37, 5.38 e 5.39 são apresentados os resultados de deconvolução dos conjuntos de tiro adquiridos respectivamente com as fontes compactador, rifle e marreta. Para cada traço de cada conjunto foi estimada uma *wavelet* diferente. No item (a) das mesmas figuras são mostradas as *wavelets* escolhidas como representativas das estimadas em cada conjunto. Comparando esses resultados com os obtidos pelo método homomórfico (figuras 5.30, 5.31 e 5.32), observa-se que os pulsos não se assemelham aos estimados pelo método homomórfico. Além disso, não é observada semelhança entre os pulsos estimados para as fontes rifle e marreta.

Figura 5. 37: Pulso representativo dos estimados no conjunto de tiro adquirido com a técnica Mini-Sosie na praça do relógio da USP pelo de relação cruzada (a); e resultado da sua aplicação na deconvolução deste conjunto de tiro pelo método de Cauchy (b).

Figura 5. 38: Pulso representativo dos estimados no conjunto de tiro adquirido com um rifle na praça do relógio da USP pelo de relação cruzada (a); e resultado da sua aplicação na deconvolução deste conjunto de tiro pelo método de Cauchy (b).

Figura 5. 39: Pulso representativo dos estimados no conjunto de tiro adquirido com uma marreta na praça do relógio da USP pelo de relação cruzada (a); e resultado da sua aplicação na deconvolução deste conjunto de tiro pelo método de Cauchy (b).

Após isto foi realizada a estimativa sobre o conjunto de tiro adquirido em Colônia. Neste caso houve maior sensibilidade à presença de ruído e foi escolhido apenas um pulso de aparência semelhante ao obtido com a técnica Mini-Sosie para a deconvolução de todo o conjunto. Na figura 5.40 (a) este pulso é comparado ao pulso estimado na técnica Mini-Sosie e na figura 5.40 (b) é mostrado o resultado da sua aplicação na deconvolução do conjunto de tiro de Colônia.

Figura 5. 40: Resultado da estimativa do pulso no conjunto de tiro adquirido com a técnica Mini-Sosie em Colônia pelo método de relação cruzada (a); e resultado da sua aplicação na deconvolução deste conjunto de tiro pelo método de Cauchy (b).

Na sequência foi realizada a estimativa para a seção empilhada da figura 5.18. Nesta foi realizada a estimativa de um pulso para cada traço e foi notada uma dificuldade maior na obtenção de estimativas nos últimos traços da seção, onde é observada uma distorção maior do pulso.

Figura 5. 41: Resultado da deconvolução da seção (figura 5.18), com as *wavelets* estimadas para os seus traços pelo método de relação cruzada.

6 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Avaliando a utilização dos métodos determinísticos, tanto a estimativa do pulso quanto da resposta impulsiva mostram que há a minimização do resíduo entre o sismograma original e o estimado. Isto pode ser observado nas figuras 5.9, 5.10, 5.11 e 5.12 de correlação entre o sismograma original e os sismogramas estimados.

Dentre os métodos de deconvolução, a deconvolução por mínimos quadrados regularizados por Cauchy levou a resultados mais interessantes quanto à diminuição de ruído, compactação dos pulsos e melhoria na qualidade do empilhamento.

Os resultados obtidos com o método de Cauchy indicam a possibilidade da utilização da *wavelet* extraída da autocorrelação do sinal medido próximo à fonte para a deconvolução dos sismogramas em casos onde não ocorram mudanças de fase da *wavelet* em função do afastamento ou outro tipo de distorção do pulso. Apesar da utilização de uma única *wavelet* ser robusta quanto à coerência da polaridade e amplitude dos eventos isto pode resultar em uma estimativa errada como a obtida nos últimos traços da figura 5.19, já que ao fim da seção empilhada da figura 5.18 é observada grande distorção pulso.

A utilização dos métodos cegos se mostra como uma opção na presença de afastamentos longos e de outros tipos de fonte. Em geral foram observados bons resultados na compactação dos pulsos, mas a utilização destes métodos também possui limitações.

O método de deconvolução por mínima entropia com restrições no domínio da frequência possui vantagens quando comparado à proposta inicial de deconvolução por mínima entropia de Wiggins (1978), como pôde ser observado nos testes sintéticos das figuras 4.10 e 4.12. Mesmo com bons níveis de compactação da *wavelet*, os impulsos mais fracos são mantidos. Entretanto pode ocorrer perda da relação de amplitude dos impulsos de um mesmo traço (figuras 4.12, 4.13 e 4.14) sendo que esta é uma informação importante para estudo dos coeficientes de reflexão.

A rotação por fase constante, embora não tenha apresentado utilidade na compactação dos impulsos, mostrou resultados coerentes com o envelope traço (figura 5.29). Isto indica que os pulsos estão sendo levados para uma fase próxima da fase zero. Desta forma, tornam possível a construção de um filtro comum para todo um conjunto de traços e de um mesmo critério de escolha dos tempos de reflexão de um mesmo evento, desde que não haja uma mudança significativa na forma da *wavelet*.

A utilização conjunta da rotação por fase constante com a estimativa do pulso pelo método homomórfico, embora tenha apresentado resíduos, mostrou uma melhor continuidade do evento de reflexão (figura 5.36) em relação ao resultado sobre a seção antes da rotação de fase (figura 5.35).

O método homomórfico mostrou limitações quanto à estimativa do pulso, sendo observado um desvio na estimativa (comparar figura 5.30 (a) com figura 5.1, para os dados da Praça do Relógio e figura 5.33 (a) para os dados de Colônia). Acredita-se que isto ocorra pelo pequeno número de traços utilizados para sua estimativa. Apesar da imprecisão na estimativa da forma de onda, para os dados da Praça do Relógio os resultados da deconvolução que apresentaram melhor qualidade foram obtidos empregando a deconvolução de Cauchy com o pulso estimado pelo método homomórfico (Figuras 5.30, 5.31 e 5.32).

O método de estimativa por relação cruzada mostrou sensibilidade à presença de ruído. Quando são comparados os resultados de estimativa nos conjuntos da praça do relógio pelo método homomórfico (figuras 5.30, 5.31 e 5.32) com os resultados obtidos pela relação cruzada (figuras 5.37, 5.38 e 5.39), os resultados obtidos pela relação cruzada se mostram piores. Além disso, foram observadas limitações para o conjunto de colônia e para grandes distorções do pulso como as observadas nos últimos da seção da figura 5.18, nesta parte onde houve distorção não foram obtidos bons resultados (figura 5.41)

7 CONCLUSÃO

Os dados sísmicos estudados mostraram as possibilidades e limitações da aplicação dos métodos determinísticos e cegos sobre dados reais na escala de investigação rasa. Foi verificada a possibilidade de utilização do sinal medido em campo como *wavelet* para a deconvolução, em casos de curto afastamento. Para casos diferentes deste existe a possibilidade de aplicação dos métodos cegos.

Nos métodos determinísticos foram obtidos bons resultados, e de fácil obtenção, para a extração do pulso. Entretanto, esta estimativa depende da resposta impulsiva se adaptando aos erros desta de forma que a diferença entre o sismograma original e o sismograma estimado pela convolução da *wavelet* estimada e a resposta impulsiva de entrada seja minimizada. Isto faz com que o método não seja ideal para utilização em algoritmos adaptativos, mas pode ser utilizado em casos onde existe uma boa estimativa da resposta impulsiva.

Para a deconvolução determinística, tanto nos resultados sintéticos quanto nos resultados reais foi percebida uma superioridade do método de Cauchy. Com este método foram obtidos resultados de boa resolução temporal e com impulsos que mantiveram a relação de amplitude após a deconvolução, sendo ideal para a aplicação em conjunto com uma boa estimativa do pulso.

A aplicação dos métodos cegos mostra grande potencial. A sua utilização proporcionou estimativas coerentes com a resposta esperada através do conhecimento apenas do traço sísmico. Entretanto, para que seja encontrada uma boa estimativa da resposta impulsiva é necessário que uma grande quantidade de parâmetros seja escolhida corretamente. Entre os métodos avaliados, a deconvolução por mínima entropia com restrições na frequência mostrou bons resultados mediante a atuação do usuário em cada etapa do algoritmo, determinando parâmetros como comprimento de filtro e frequências de corte. A desvantagem do método é que a relação entre as amplitudes dos impulsos de um mesmo traço pode não ser mantida. Além disso, o método pode apresentar um deslocamento constante na posição dos impulsos encontrados.

Uma alternativa seria a utilização deste método em conjunto com rotação por fase constante para que todos os traços tenham pulsos com fase parecida. Entretanto, o método de rotação de fase apresentou pouca precisão, necessitando ser testado em outros conjuntos de dados para que seja melhor avaliado. Outra alternativa seria a correção dos tempos através da

autocorrelação da resposta estimada com alguma informação conhecida, como o envelope do traço, por exemplo.

Outra opção seria a realização de uma estimativa da *wavelet* para posterior aplicação na deconvolução com um método determinístico. No método de Cauchy não foram encontrados os problemas da deconvolução por mínima entropia com restrições na frequência, desde que uma boa estimativa do pulso fosse fornecida.

Entre os dois métodos estudados para a estimativa da *wavelet* (método homomórfico e relação cruzada) o método de estimativa homomórfica apresentou melhores resultados, entretanto este é sensível à presença de ruído e à quantidade reduzida de traços utilizados na sísmica rasa, o que acarreta na estimativa incorreta do pulso.

No método de relação cruzada, a dificuldade nas estimativas esta na presença de ruído. O método não comporta ruído coerente e mesmo o ruído aleatório deve estar em um nível baixo, o que é difícil mesmo após o processamento. Os dados com apenas uma reflexão apresentaram melhores resultados. Foi possível estimar a resposta impulsiva, mesmo a *wavelet* estimada não sendo necessariamente a contida no traço.

Desta forma, os resultados obtidos neste trabalho apontam que melhores resultados na deconvolução podem ser obtidos se forem estudadas outras estratégias de estimativa da *wavelet*. Existem diferentes técnicas que podem ser avaliadas, e uma atenção especial pode ser dada a análise de componentes independentes (ICA) e a diferentes métodos cegos. A sísmica em geral não tem acompanhado outras áreas como a comunicação digital que está repleta de alternativas em métodos cegos de identificação.

REFERÊNCIAS

BARBIER, M. G. **The Mini-Sosie Method**. International Human Resources Development. Boston, p. 90. 1983.

BERKHOUT, A. J. Least-Squares Inverse Filtering and Wavelet Deconvolution. **Geophysics**, v. 42, p. 1369-1383, Dezembro 1977. ISSN 7.

BUTTKUS, B. Homomorphic filtering - theory and practice. **Geophysical Prospecting**, v. 23, p. 712-748, 1975.

CALDERÓN-MACÍAS, C.; SEN, M. K.; STOFFA, P. L. Hopfield neural networks, and mean field annealing for seismic deconvolution and multiple attenuation. **Geophysics**, v. 62, p. 992-1002, Maio-Junho 1997. ISSN 3.

CHEN, Z.; LU, W. Joint deconvolution by signal subspace tracking. **SEG Denver 2010 Annual Meeting**, Denver, 2010. 3684-3688.

CLAERBOUT, J. F. **Fundamentals of geophysical data processing with applications to petroleum prospecting**. [S.l.]: Blackwell Scientific Publications, 1985.

CLAUSIUS, R. **The Mechanical Theory of heat - with its Applications to the Steam Engine and to Physical Properties of Bodies**. [S.l.]: [s.n.], 1865.

COHEN, J. K.; STOCKWELL, J. W. **CWP/SU: Seismic Unix Release 42: A Free Package for Seismic Research and Processing**. Center for Wave Phenomena. Colorado School of Mines. Colorado. 2010.

DE VRIES, D. Velocity Analysis Based on Minimum Entropy, Livro. p. 186, June 1984.

DIOGO, L. A. Reflexão sísmica rasa acima do ângulo crítico de incidência: aquisição, processamento e interpretação. **SIMPÓSIO DE GEOFÍSICA DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE GEOFÍSICA**, São Paulo, 2004.

DIOGO, L. A.; LE DIAGON, F. M. M.; PRADO, R. L. Bedrock imaging using post-critical shallow reflection data. **Journal of applied Geophysics**, v. 57, p. 1-9, 2004.

DONDURUR, D. An Approximation to Sparse-Spike Reflectivity Using the Gold Deconvolution Method. **Pure and Applied Geophysics**, v. 167, p. 1233–1245, 2010.

DONOHU, D. On Minimum Entropy Deconvolution. **Proc 2nd Applied Time Series Symp**, v. 109, n. 6, p. 565-608, 1981.

FOMEL, S.; VAN DER BAAN, M. Local similarity with the envelope as a seismic phase detector. **SEG Denver**, 2010.

GARDNER, W. A. A new method of channel identification. **IEEE Transactions on communications**, v. 39, p. 813-817, Junho 1991.

GOMES, M. D. V. C. N. **Aplicação de deconvolução homomórfica a dados sísmicos**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Pará. [S.l.], p. 106. 1998.

HERRERA, R. H.; VAN DER BAAN, M. Revisiting Homomorphic Wavelet Estimation and Phase Unwrapping. **CSPG CSEG CWLS 2011 Joint Annual Convention**, 2011.

HOPFIELD, J. Neurons with graded response have collective computational properties like those of two-state neurons. **Proc. of National Academy of Sciences**, v. 81, p. 3088-3092, 1984.

LEVY, S.; OLDENBURG, D. W. Automatic phase correction of common-midpoint stacked data. **Geophysics**, v. 52, p. 51-59, Janeiro 1987.

Longbottom, J.; Walden, A. T.; White, R. E. Principles and application of maximum kurtosis phase estimation. **Geophysical Prospecting**, v. 36, p. 115-138, 1988.

LUO, H.; LI, Y. The Application of Blind Channel Identification Techniques to Prestack Seismic Deconvolution. **Proceedings of the IEEE**, v. 86, p. 2082-2098, October 1998.

MENDES, S. **Levantamento de Reflexão Sísmica Rasa Empregando Fonte Mini-Sosie em Afastamentos Longos**. Trabalho de Graduação. IAG/USP. São Paulo. 2011.

MORHAC, M. Deconvolution methods and their applications in the analysis of gamma-ray spectra, p. 22-27, Maio 2005.

MORHAC, M. et al. Efficient one- and two-dimensional Gold deconvolution and its application to gamma-ray spectra decomposition. **Nuclear Instr. Meth. Phys. Res.**, v. A 401, p. 385-408, 1997.

MORHAC, M.; MATOUSEK, V. Multidimensional FFT based positive definite Gold deconvolution algorithm. **J. Elect. Engin.**, v. 56, p. 141-145, 2005.

MORHAC, M.; MATOUSEK, V.; KLIMAN, J. Efficient algorithm of multidimensional deconvolution and its application to nuclear data processing. **Digital Signal Proc.**, v. 13, p. 144-171, 2003.

OPPENHEIM, A. V. **Optimum homomorphic filters**. Research Lab. of Electronics, MIT. [S.l.]. 1965. (248-260).

OPPENHEIM, A. V. **Superposition in a class of non-linear systems**. Research Lab. of Electronics MIT. [S.l.], p. 76. 1965. (432).

OPPENHEIM, A. V.; SCHAFER, R. W.; STOCKHAM, T. G. Nonlinear filtering of multiplied and convolved signals. **Proceedings of IEEE**, v. 65, p. 1264-1291, 1968.

OTIS, R. M.; SMITH, R. B. Homomorphic Deconvolution by log spectral averaging. **Geophysics**, v. 42, p. 1146-1157, October 1977. ISSN 6.

PORSANI, J. L. et al. Investigações geofísicas de superfície e de poço no sítio controlado de geofísica rasa do IAG-USP. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 22, p. 245-258, 2004. ISSN 3.

POSTIC, A.; FOURMANN, J.; CLAERBOUT, J. Parsimonious deconvolution. **Presented at the 50th Ann. mtg., Soc. Expl. Geophys.**, 1980.

PULLAN, S. E.; HUNTER, J. A. Seismic model studies of the overburden-bedrock reflection. **Geophysics**, v. 50, p. 1684-1688, novembro 1985.

RICCOMINI, C. et al. The Colônia structure. **Meteoritics & Planetary Science**, v. 46, p. 1630-1639, 2011.

SACCHI, M. D. Reweighting strategies in seismic deconvolution. **Geophys. J. Int.**, Vancouver, v. 129, p. 651-656, 1997.

SACCHI, M. D. **Seismic Lab**. Signal Analysis and Imaging Group. Alberta. 2008.
SACCHI, M. D.; VELIS, D. R.; COMÍNGUEZ, A. H. Minimum entropy deconvolution with frequency-domain constraints. **Geophysics**, v. 59, n. 6, p. 938-945, June 1994.

SAGGAF, M. M.; ROBINSON, E. A. A unified framework for the deconvolution of traces of nonwhite reflectivity. **Geophysics**, v. 65, p. 1660-1676, Setembro-Outubro 2000. ISSN 5.

SHANNON, C. E. A Mathematical Theory of Communication. **The Bell System Technical Journal**, v. 27, p. 379-423, July, October 1948.

SPADINI, A. S.; DIOGO, L. A. Aplicação de identificação cega de canais à deconvolução sísmica. **12º Congresso Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica**, Rio de Janeiro, p. 6, agosto 2011.

TONG, L.; PERREAU, S. Multichannel Blind Identification: From Subspace to Maximum Likelihood Methods. **Proceedings of the IEEE**, p. 1951-1968, 1998.

ULRYCH, T. J. Application of homomorphic deconvolution to seismology. **GEOPHYSICS**, v. 36, p. 650-660, agosto 1971. ISSN 4.

VAN DER BAAN, M. Time-varying wavelet estimation and deconvolution using kurtosis maximization. **Geophysics**, v. 73, p. V11-V18, 2008.

VAN DER BAAN, M.; PHAM, D.-T. Robust wavelet estimation and blind deconvolution of noisy surface seismics. **Geophysics**, v. 73, p. V37-V46, Outubro 2008. ISSN 5.

WANG, L.-X.; MENDEL, J. M. Adaptive minimum prediction-error deconvolution and source wavelet estimation using hopfield neural networks. **Geophysics**, v. 57, p. 670-679, Maio 1992. ISSN 4.

WANG, S. et al. An FFT- Based Method for Blind Identification of FIR SIMO Channels. **IEEE Signal Processing Letters**, v. 14, p. 437-440, July 2007. ISSN 7.

WHITE, R. E. Maximum kurtosis phase correction. **Geophysical Journal**, v. 95, p. 371-389, 1988.

WIGGINS, R. A. Minimum Entropy Deconvolution. **Geoexploration**, Amsterdam, v. 16, p. 21-35, 1978.

XU, G. et al. A Least-Squares Approach to Blind Channel Identification. **IEEE Transactions on Signal Processing**, v. 43, p. 2982-2993, Dezembro 1995. ISSN 12.