

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**Interpolação e regularização de dados sísmicos usando a
transformada de Radon linear (*tau-p*) 2D e 3D**

Autor: DIONE CHERPINSKY MORAES

Orientador: PROF. DR. RODRIGO DE SOUZA PORTUGAL

Co-orientador: DR. CARLOS ALVES DA CUNHA FILHO

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**Interpolação e regularização de dados sísmicos usando a
transformada de Radon linear (τ - p) 2D e 3D**

Autor: DIONE CHERPINSKY MORAES

Orientador: PROF. DR. RODRIGO DE SOUZA PORTUGAL

Co-orientador: DR. CARLOS ALVES DA CUNHA FILHO

Curso: Ciências e Engenharia de Petróleo

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

Campinas, 2004

SP - Brasil

UNIDADE BC
Nº CHAMADA 79644
V. 10P
TOMOS 129-03
PROC D
C x
PREÇO 11,00
DATA 09-12-03
BIB-ID _____

**FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHERIA - BAE - UNICAMP**

Moraes, Dione Cherpinsky

M791i Interpolação e regularização de dados sísmicos usando a transformada de Radon linear (*tau-p*) 2D e 3D / Dione Cherpinsky Moraes. - -Campinas, SP:[s.n.], 2004.

Orientadores: Rodrigo de Souza Portugal, Carlos Alves da Cunha Filho.

Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica e Instituto de Geociências.

1. Geofísica. 2. Radon, Transformadas de. 3. Método sísmico de reflexão – Processamento de dados. I. Portugal, Rodrigo de Souza. II. Cunha Filho, Carlos Alves da. III. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. IV. Instituto de Geociências. V. Título.

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

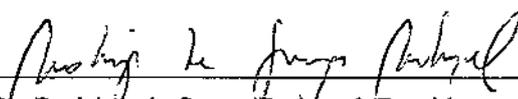
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**Interpolação e regularização de dados sísmicos usando a
transformada de Radon linear (τ - p) 2D e 3D**

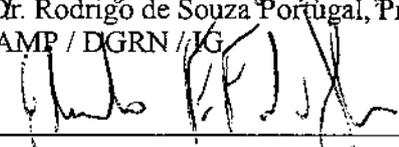
Autor: DIONE CHERPINSKY MORAES

Orientador: PROF. DR. RODRIGO DE SOUZA PORTUGAL

Banca Examinadora:



Prof. Dr. Rodrigo de Souza Portugal, Presidente
UNICAMP / DGRN / IG



Dr. Eduardo Filpo
PETROBRAS



Prof. Dr. Maria Cristina de Castro Cunha
UNICAMP / IMECC

Campinas, 20 de dezembro de 2004

2008 28276

Dedicatória

Aos meus pais, Bernardino e Adair.

Agradecimentos

Meus agradecimentos às pessoas que me ajudaram durante estes dois anos:

Ao Alexandre pelo total apoio em todos os aspectos.

Ao Carlinhos e ao Rodrigo pela paciência, pela dedicação e por facilitarem o caminho e estimularem meu aprendizado.

À Neiva pelas valiosas dicas.

À Ana por não ter dado trabalho.

À Denise pela terapia telefônica.

À Gilvane por me dar condições de só pensar neste trabalho.

Ao Lu, à Ju e à Tânia pelas horas de relaxamento.

À Petrobras pela oportunidade de fazer o mestrado.

Resumo

MORAES, Dione. *Interpolação e regularização de dados sísmicos usando a transformada de Radon linear ($\tau-p$) 2D e 3D*. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, 2004. 103p. Dissertação (Mestrado)

Os levantamentos sísmicos são parametrizados para que os dados sejam adquiridos segundo uma malha regular. Tal regularidade quase nunca é possível, pois durante a aquisição dos dados ocorrem obstáculos operacionais como cidades, estradas, plataformas e áreas de preservação ambiental, dentre muitos outros. Em dados marítimos sempre ocorre outro tipo de irregularidade, que é a deriva do cabo de hidrofones devido a correntes oceânicas.

Tenta-se então regularizar esses dados no início do processamento sísmico, para que processos cruciais como análise de velocidades e migração tenham melhores desempenhos.

Neste trabalho, a interpolação e regularização dos dados são feitas com auxílio da transformada $\tau - p$. Os algoritmos desenvolvidos utilizam a técnica do empilhamento oblíquo.

Para os casos 2D e 3D, os parâmetros ideais são discutidos para que o dado retorne do domínio $\tau - p$ com a menor quantidade de artefatos possível. A regularização dos dados é realizada quando há deriva de cabos de hidrofones. A forma e a amplitude do sinal são preservadas quando realizam-se as transformadas $\tau - p$ direta e inversa.

Para o caso 2D, também são estudadas a interpolação de dados e a regularização quando ocorre um longo trecho sem informação sísmica.

Palavras chave

Geofísica, Radon, Transformadas de, Método sísmico de reflexão – Processamento de dados.

Abstract

MORAES, Dione. *Interpolation and regularization of seismic data using 2D and 3D Linear Radon Transforms (τ - p)*. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, 2004. 103p. Dissertação (Mestrado)

Seismic surveys are designed on the purpose that all samples collected during the seismic experiment fall on a specific regular grid. Nevertheless, this data regularity is almost impossible to achieve due to different obstacles during seismic acquisition such as constructions (cities, pipelines or other facilities), roads, platforms, preservation areas and so on. A very important non-cultural irregularity which occurs during marine seismic surveys and shall be part of our main concern is hydrophone cable drift caused by ocean currents (cable feathering).

These irregularities shall be treated in the first steps of seismic data processing and data regularization can be the right tool to be used. Regularization may improve the overall performance of important steps in seismic processing like velocity analysis and migration.

Data interpolation and regularization are performed using the $\tau - p$ transform, with slant stack 2D and 3D algorithms. We discuss different issues in 2D and 3D data regularization using $\tau - p$ transforms such as ideal parameterization to avoid artifacts and the 2D experiments related to interpolation and regularization of gaps in seismic information and cable feathering.

Requirements for amplitude and phase preservation when the pair of $\tau - p$ transforms is performed are also discussed.

Key Words

Geophysics, Radon, Transforms, Seismic Reflection Method – Data Processing.

Conteúdo

Lista de Figuras	xxiv
1 Introdução	1
2 A transformada $\tau - p$ 2D	5
2.1 Decomposição de um campo de ondas registrado em um conjunto de ondas planas .	5
2.2 Empilhamento oblíquo	8
2.3 Considerações sobre a amplitude do sinal	13
2.4 Transformada $\tau - p$ por Transformada de Fourier	14
2.5 Descrição do algoritmo	14
3 Parametrização e testes da transformada $\tau - p$ 2D	17
3.1 Falseamento	20
3.2 Interpolação de dados	38
3.3 Regularização de dados	45
4 A transformada $\tau - p$ 3D	69
4.1 Transformada $\tau - p$ 3D por Transformada de Fourier	72
4.2 Descrição do algoritmo	72
4.3 Parametrização da transformada $\tau - p$ 3D	74
4.4 Falseamento	77
4.5 Testes de Falseamento	81
4.6 Regularização 3D	93

4.7	Conclusões	95
5	Conclusões e Sugestões	99
	Referências Bibliográficas	101
A	Propriedade do deslocamento em tempo da Transformada de Fourier	103

Lista de Figuras

2.1	Geração de ondas planas. (a) Onda plana de incidência vertical. Os tiros, simbolizados por “*”, são detonados simultaneamente. (b) Onda plana inclinada. Os tiros são detonados da esquerda para a direita.	6
2.2	Transformada $\tau - p$ (a) Reta no domínio $t - x$ (b) Ponto no domínio $\tau - p$	8
2.3	Transformada $\tau - p$ (a) Feixe de retas paralelas (b) Feixe de retas concorrentes . . .	9
2.4	Exemplo esquemático do Empilhamento Oblíquo para um valor de p . Da esquerda para direita: deslocamentos no tempo para cada traço, soma dos traços e o resultado da soma é depositado em um ponto no domínio $\tau - p$	10
2.5	Transformada Tau-p. Os dados no domínio $t - x$ são somados ao longo de retas e o resultado é depositado no domínio $\tau - p$. Um evento hiperbólico no domínio $t - x$ se transforma num evento elíptico no domínio $\tau - p$	11
2.6	(a) Traço central de entrada, tempo em ms. (b) Traço central do dado reconstituído sem a aplicação do <i>filtro rho</i> , tempo em s; (c) Traço central do dado reconstituído com a aplicação do <i>filtro rho</i> , tempo em s.	12
3.1	Modelo de camadas planas e horizontais com velocidades constantes.	18
3.2	Falseamento espacial. (a) Transformada direta: $\Delta\tau$ depende da inclinação p e Δx ; (b) Transformada inversa: $\Delta\tau$ depende da inclinação x e Δp	21
3.3	Sismograma proveniente do modelo de camadas planas horizontais, lança:-2000m a 2000m, $\Delta x = 25m$ e $nx = 161$	24
3.4	Sismogramas reconstituídos no domínio $t - x$, $\Delta x = 25m$. (a) Dado reconstituído, $np = 599$; (b) Dado reconstituído, $np = 1335$. Ambos com controle de falseamento.	25

3.5	Sismogramas reconstituídos no domínio $t - x$, $\Delta x = 25\text{m}$. (a) Dado reconstituído, $np = 161$; (b) Dado reconstituído, $np = 299$. Ambos com controle de falseamento.	26
3.6	Traço central $nx = 81$. (a) Modelo $\Delta x = 25\text{m}$, tempo em ms. (b) Dado reconstituído, $np = 1335$; (c) Dado reconstituído, $np = 599$. (b) e (c) com controle de falseamento e escala temporal em s.	27
3.7	Traço central $nx = 81$. (a) Modelo $\Delta x = 25\text{m}$, tempo em ms. (b) Dado reconstituído, $np = 299$; (c) Dado reconstituído, $np = 161$. (b) e (c) com controle de falseamento e escala temporal em s.	28
3.8	Primeiro traço $nx = 1$. (a) Modelo $\Delta x = 25\text{m}$, tempo em ms. (b) Dado reconstituído, $np = 1335$; (c) Dado reconstituído, $np = 599$. (b) e (c) com controle de falseamento e escala temporal em s.	29
3.9	Primeiro traço $nx = 1$. (a) Modelo $\Delta x = 25\text{m}$, tempo em ms. (b) Dado reconstituído, $np = 299$; (c) Dado reconstituído, $np = 161$. (b) e (c) com controle de falseamento e escala temporal em s.	30
3.10	Sismogramas reconstituídos no domínio $t - x$, $\Delta x = 25\text{m}$. (a) Dado reconstituído com controle de falseamento; (b) Dado reconstituído sem controle de falseamento. Ambos reconstituídos com $np = 599$	31
3.11	Sismograma diferença entre o modelo $\Delta x = 25\text{m}$ reconstituído com $np = 599$ sem o controle de falseamento e com este controle. Maior ganho.	32
3.12	Sismogramas reconstituídos no domínio $t - x$, $\Delta x = 25\text{m}$. (a) Dado reconstituído com controle de falseamento; (b) Dado reconstituído sem controle de falseamento. Ambos reconstituídos com $np = 161$	33
3.13	Sismogramas transformados no domínio $\tau - p$ (transformada direta). (a) Dado transformado com controle de falseamento; (b) Dado transformado sem controle de falseamento. Ambos transformados com $np = 599$	34
3.14	Sismograma proveniente do modelo de camadas planas horizontais, lanço:-2000m a 2000m, $\Delta x = 50\text{m}$ e $nx = 81$	35

3.15	Sismogramas reconstituídos no domínio $t - x$, $\Delta x = 50\text{m}$. (a) Dado reconstituído com controle de falseamento; (b) Dado reconstituído sem controle de falseamento. Ambos reconstituídos com $np = 599$	36
3.16	Sismogramas transformados no domínio $\tau - p$ (transformada direta), $\Delta x = 50\text{m}$. (a) Dado transformado com controle de falseamento; (b) Dado transformado sem controle de falseamento. Ambos transformados com $np = 599$	37
3.17	(a) Sismograma proveniente do modelo de camadas planas horizontais, lanço:-2000m a 2000m, $\Delta x = 50\text{m}$ e $nx = 81$, escala de tempo em ms; (b) Dado reconstituído, $\Delta x = 50\text{m}$, escala de tempo em s.	39
3.18	(a) Dado reconstituído $\Delta x = 50\text{m}$, interpolado para $\Delta x = 25\text{m}$, $nx = 161$; (b) Dado reconstituído $\Delta x = 50\text{m}$, interpolado para $\Delta x = 12,5\text{m}$, $nx = 321$. As setas indicam o início do falseamento nos dois eventos mais rasos.	41
3.19	(a) Dado reconstituído $\Delta x = 50\text{m}$, interpolado para $\Delta x = 25\text{m}$, $nx = 161$; (b) Dado reconstituído $\Delta x = 50\text{m}$, interpolado para $\Delta x = 12,5\text{m}$, $nx = 321$. Ambos com NMO aplicado antes da transformada $\tau - p$	42
3.20	(a) Sismograma sintético proveniente do modelo Marmousi, lanço:-2575m a 2575m, $\Delta x = 25\text{m}$ e $nx = 207$; (b) Seleção dos traços pares que será a entrada para a transformada $\tau - p$, $nx = 103$ e $\Delta x = 50\text{m}$; (c) Dado reconstituído, interpolado com $\Delta x = 25\text{m}$ e $nx = 207$	43
3.21	(a) Seleção dos traços ímpares do sismograma de Marmousi, tais traços não foram usados na transformada do teste anterior; (b) Dado reconstituído, traços interpolados correspondentes à (a); (c) Sismograma diferença ente (a) e (b).	44
3.22	Modelo $\Delta x = 25\text{m}$, com ausência de trinta traços, $nx = 131$	47
3.23	(a) Dado reconstituído, $nx = 131$, com ponderador; (b) Dado reconstituído, $nx = 131$, sem ponderador	48
3.24	(a) Dado reconstituído com distância de referência igual a 2 vezes a distância média; (b) Dado reconstituído com distância de referência igual a 4 vezes a distância média entre traços.	50

3.25	(a) Dado reconstituído, controle de falseamento variando apenas com p ; (b) Dado reconstituído, controle de falseamento com ponderador local; (b) Dado reconstituído, controle de falseamento com ponderador máximo.	52
3.26	Aplicação de NMO antes da transformada $\tau - p$. (a) Dado reconstituído, controle de falseamento variando apenas com p ; (b) Dado reconstituído, controle de falseamento com ponderador local; (c) Dado reconstituído, controle de falseamento com ponderador máximo.	53
3.27	Comparação entre o traço no centro do trecho sem informação. (a) Traço central zerado do modelo com ausência de 30 traços; (b) Traço equivalente proveniente de um modelo com todos os traços; (c) Traço equivalente proveniente do dado reconstituído, controle de falseamento com ponderador local; (d) Traço equivalente proveniente do dado reconstituído, controle de falseamento com ponderador máximo. (c) e (d) reconstituídos com NMO aplicado	54
3.28	Aplicação de NMO com velocidades erradas antes da transformada $\tau - p$, controle de falseamento com ponderador local. (a) Dado reconstituído, erro de 1% nas velocidades; (b) Dado reconstituído, erro de 3% nas velocidades; (c) Dado reconstituído, erro de 5% nas velocidades.	55
3.29	Aplicação de NMO com velocidades erradas antes da transformada $\tau - p$, controle de falseamento com ponderador máximo. (a) Dado reconstituído, erro de 1% nas velocidades; (b) Dado reconstituído, erro de 3% nas velocidades; (c) Dado reconstituído, erro de 5% nas velocidades.	56
3.30	Comparação entre o traço central do trecho sem informação. (a) Traço equivalente proveniente do modelo com todos os traços; (b) Traço equivalente proveniente do dado reconstituído, controle de falseamento com ponderador local, NMO aplicado com velocidade exata; (c) Traço equivalente proveniente do dado reconstituído, controle de falseamento com ponderador local, NMO aplicado com erro de 5% na velocidade.	57

3.31	Comparação entre o traço central do trecho sem informação. (a) Traço equivalente proveniente do modelo com todos os traços; (b) Traço equivalente proveniente do dado reconstituído, controle de falseamento com ponderador máximo, NMO aplicado com velocidade exata; (c) Traço equivalente proveniente do dado reconstituído, controle de falseamento com ponderador máximo, NMO aplicado com erro de 5% na velocidade.	58
3.32	Modelo $dx = 5m$, com traços zerados, evidenciando as irregularidades. Simulação de $\Delta x \simeq 25m$ irregular.	59
3.33	(a) Dado reconstituído, regularizado $\Delta x = 25m$, com ponderador; (b) Dado reconstituído, regularizado $\Delta x = 25m$, sem ponderador.	60
3.34	Detalhe do refletor mais profundo. (a) Dado reconstituído, regularizado $\Delta x = 25m$, com ponderador; (b) Dado reconstituído, regularizado $\Delta x = 25m$, sem ponderador.	61
3.35	Dados reconstituídos e regularizados para $\Delta x = 25m$. (a) Reconstituído com distância de referência igual a 2 vezes a distância média entre traços; (b) Reconstituído com distância de referência igual a 4 vezes a distância média entre traços.	62
3.36	Dados reconstituídos e regularizados para $\Delta x = 25m$. (a) Controle de falseamento original; (b) Controle de falseamento usando ponderador local; (c) Controle de falseamento usando ponderador máximo.	63
3.37	Dados reconstituídos e regularizados para $\Delta x = 25m$. Aplicação prévia de NMO. (a) Controle de falseamento original; (b) Controle de falseamento usando ponderador local; (c) Controle de falseamento usando ponderador máximo.	64
3.38	Detalhe do evento de reflexão correspondente ao refletor mais raso. Dados reconstituídos e regularizados para $\Delta x = 25m$. Aplicação prévia de NMO. (a) Controle de falseamento original; (b) Controle de falseamento usando ponderador local; (c) Controle de falseamento usando ponderador máximo.	65
3.39	(a) Modelo sismograma $\Delta x = 25m$ com ausência de trinta traços; (b) NMO. Dado reconstituído com controle de falseamento usando o ponderador local.	66
3.40	(a) Modelo sismograma Δx irregular; (b) NMO. Dado reconstituído com controle de falseamento usando o ponderador máximo, regularizado $\Delta x = 25m$	67

4.1	Transformada $\tau - p$ 3D, onde três planos paralelos no domínio $t - x - y$, de inclinações p_x e p_y , porém com diferentes valores de τ , são transformados em 3 pontos no domínio $\tau - p_x - p_y$	70
4.2	Modelo geológico 3D de camadas planas horizontais com velocidades constantes .	74
4.3	Dispositivo de registro. (a) Lanço bipartido simétrico -1250m a 1250m. $n_x = 51$, $\Delta x = 50m$, $n_y = 5$ e $\Delta y = 200m$; (b) Lanço "end-on" 0 a 2000m. $n_x = 41$, $\Delta x = 50m$, $n_y = 5$ e $\Delta y = 200m$	76
4.4	Sismograma 3D. Lanço bipartido simétrico -1250m a 1250m. $n_x = 51$, $\Delta x = 50m$, $n_y = 5$ e $\Delta y = 200m$	77
4.5	Sismograma 3D. Lanço bipartido simétrico -1250m a 1250m, com os parâmetros $n_x = 51$, $\Delta x = 50m$, $n_y = 5$ e $\Delta y = 200m$. Linhas lado a lado ; (a) Linha 1, afastamento y em relação à fonte de -400m; (b) Linha 2, $afasty = -200m$; (c) Linha central 3, $afasty = 0m$; (d) Linha 4, $afasty = 200m$; (e) Linha 5, $afasty = 400m$	78
4.6	Sismograma 3D. Lanço "end-on" 0 a 2000m, com os parâmetros $n_x = 41$, $\Delta x = 50m$, $n_y = 5$ e $\Delta y = 200m$. Linhas lado a lado ; (a) Linha 1, afastamento y em relação à fonte de -400m; (b) Linha 2, $afasty = -200m$; (c) Linha central 3, $afasty = 0m$; (d) Linha 4, $afasty = 200m$; (e) Linha 5, $afasty = 400m$	79
4.7	Dado reconstituído 3D com controle de falseamento. Lanço bipartido simétrico -1250m a 1250m. $n_x = 51$, $\Delta x = 50m$, $n_y = 5$ e $\Delta y = 200m$. (a) $np_x = 187$ e $np_y = 59$ (b) $np_x = 375$ e $np_y = 119$	82
4.8	Amplitude do traço central da linha central 3 (a) Modelo 3D, lanço bipartido simétrico -1250m a 1250m. $n_x = 51$, $\Delta x = 50m$, $n_y = 5$ e $\Delta y = 200m$, escala de tempo em ms; (b) Dado reconstituído com $np_x = 187$ e $np_y = 59$ (c) Dado reconstituído com $np_x = 375$ e $np_y = 119$. (b) e (c) com escala de tempo em s. . . .	83
4.9	(a) Modelo de entrada $n_x = n_y = 51$, $\Delta x = \Delta y = 50m$; (b) Dado reconstituído $np_x = np_y = 201$	84

4.10	Amplitude do traço central da linha central 26. (a) Modelo 3D, lanço bipartido simétrico -1250m a 1250m. $n_x = n_y = 51$, $\Delta x = \Delta y = 50\text{m}$, escala de tempo em ms; (b) Dado reconstituído com $np_x = np_y = 201$, escala de tempo em s.	85
4.11	Simograma 3D. Dado reconstituído $np_x = np_y = 201$. (a) Seção $n_y = 26$; (b) "Time slice" = 1.38s.	86
4.12	Simograma 3D no domínio $\tau - p$ (transformada direta). Dado transformado $np_x = np_y = 201$. (a) Seção $np_y = 101$; (b) "Time slice" = 1.16s.	87
4.13	Gráfico das amplitudes ao longo do refletor mais profundo da linha central 26. A amplitude do dado reconstituído com $np_x = np_y = 201$ estão plotadas junto com as amplitudes do modelo de entrada.	88
4.14	Dado reconstituído 3D com controle de falseamento. Linha central 3. Lanço "end-on" 0 a 2000m. $n_x = 41$, $\Delta x = 50\text{m}$, $n_y = 5$ e $\Delta y = 200\text{m}$. (a) $np_x = 149$ e $np_y = 59$ (b) $np_x = 299$ e $np_y = 119$	89
4.15	Amplitude do primeiro traço da linha central 3 (a) Modelo 3D, lanço "end-on" 0 a 2000m. $n_x = 41$, $\Delta x = 50\text{m}$, $n_y = 5$ e $\Delta y = 200\text{m}$; (b) Dado reconstituído com $np_x = 149$ e $np_y = 59$ (c) Dado reconstituído com $np_x = 299$ e $np_y = 119$	90
4.16	Dado reconstituído 3D com controle de falseamento. Linha central 21. Lanço "end-on" 0m a 2000m. (a) Modelo 3D $n_x = n_y = 41$, $\Delta x = \Delta y = 50\text{m}$; b) $np_x = 149$ e $np_y = 59$	91
4.17	Amplitude do traço central da linha central 21. (a) Modelo 3D, lanço "end-on" 0m a 2000m. $n_x = n_y = 41$, $\Delta x = \Delta y = 50\text{m}$, escala de tempo em ms; (b) Dado reconstituído do modelo $n_x = 41$ e $n_y = 5$ com $np_x = 149$ e $np_y = 59$; (c) Dado reconstituído do modelo $n_x = n_y = 41$ com $np_x = np_y = 201$. (b) e (c) com escala de tempo em s.	92
4.18	Coordenadas dos receptores do modelo com deriva. O tiro é dado na posição(0,0). O modelo possui $n_x = 51$, $\Delta x = 200\text{m}$, $n_y = 5$ $\Delta y = 200\text{m}$ e lanço do tipo "end-on" 0 a 2500m.	93
4.19	Malha regular em subsuperfície. Os receptores são deslocados de modo que a nova posição do CMP esteja no centro de uma cela.	94

4.20	Linha central 3. (a) Modelo 3D regular $n_x = 51, \Delta x = 50\text{m}, n_y = 5 \Delta y = 200\text{m};$ (b) Dado reconstituído com os CMPs regularizados $n_{px} = 375 n_{py} = 119.$	95
4.21	Detalhe dos dois eventos de reflexão relativos aos dois refletores mais rasos. (a) Modelo 3D regular $n_x = 51, \Delta x = 50\text{m}, n_y = 5 \Delta y = 200\text{m};$ (b) Dado reconstituído com os CMPs regularizados $n_{px} = 375 n_{py} = 119.$	96
4.22	Detalhe dos dois eventos de reflexão relativos aos dois refletores mais profundos. (a) Modelo 3D regular $n_x = 51, \Delta x = 50\text{m}, n_y = 5 \Delta y = 200\text{m};$ (b) Dado recon- stituído com os CMPs regularizados $n_{px} = 375 n_{py} = 119.$	97
4.23	Comparação das amplitudes máximas ao longo do refletor mais profundo do mo- delo adquirido de forma regular e do dado reconstituído com os CMPs regularizados.	98

Capítulo 1

Introdução

Na atividade de processamento sísmico, vários métodos de mudança de domínio são usados para que certas estruturas de interesse, ou mesmo, certos ruídos coerentes que se deseje eliminar possam ser evidenciados ou discriminados. O domínio de aquisição dos dados sísmicos é o espaço $t - x$, onde t é o tempo de propagação de uma onda elástica pelas rochas e x representa a distância entre a fonte sísmica e o receptor (geofones ou hidrofones). A partir desse domínio, várias reorganizações do dado são feitas no processamento. Além disso, algumas transformadas como a transformada de Fourier e a transformada de Radon, da qual a transformada $\tau - p$ é um caso particular (transformada de Radon linear), oferecem possibilidades de estudos para melhorar a imagem em subsuperfície.

A transformada de Radon foi desenvolvida por J. Radon e publicada em alemão em 1917 (Turner, 1990). A transformada de Radon linear ou transformada $\tau - p$ e suas aplicações no processamento de dados sísmicos começaram em 1974 com publicações de Bessonova (1974) e Claerbout (1974) e foram amplamente estudadas por vários autores durante a década de oitenta. Esta transformada, que matematicamente é a soma de dados sobre uma reta, no domínio $t - x$, associando o resultado obtido em um ponto, no domínio $\tau - p$, cria alguns artefatos no dado reconstituído, isto é, quando se vai para o domínio $\tau - p$ e volta para o domínio $t - x$.

Tais artefatos ocorrem devido à discretização e às limitações impostas pela aquisição do dado sísmico de reflexão, tais como o comprimento do lançaço, ou seja, o número de receptores que estão registrando no momento em que é acionada a fonte sísmica, e a distância entre estes receptores.

Se o comprimento do lançaço não for suficientemente grande e a distância entre receptores não for pequena o bastante, aparecerão, no dado reconstituído, artefatos que são chamados de efeitos de borda e falseamento. Tais efeitos e a parametrização necessária para evitá-los serão discutidos neste trabalho.

Com a evolução das técnicas de aquisição sísmica (lanços cada vez maiores, superiores a três quilômetros, e intervalos entre receptores pequenos, da ordem de vinte e cinco metros), a transformada $\tau - p$ e suas diversas aplicações no processamento sísmico, estudadas na década de oitenta, voltaram a ser objeto de estudo no fim da década de noventa. Um desafio é utilizar a transformada $\tau - p$ no processamento de dado sísmico tridimensional.

O objetivo deste trabalho é desenvolver os algoritmos que realizam as transformadas $\tau - p$ 2D e 3D e, também, estudar a interpolação e regularização de dados sísmicos bidimensionais e tridimensionais com auxílio dessas transformadas.

A interpolação de dados é realizada sempre que for necessário definir um novo espaçamento entre traços, diferente do original. É comum utilizar a interpolação de trechos de linhas sísmicas marítimas que foram adquiridas com dois intervalos de amostragem espacial distintos. Em algumas vezes, simplesmente interpola-se o dado para que o número de traços da saída seja o dobro ou o quádruplo do de entrada.

Normalmente os dados sísmicos são adquiridos de maneira irregular. Em dados terrestres, é comum existirem obstáculos operacionais, como cidades, casas e estradas. Em dados marítimos, a deriva do cabo de hidrofones devido às correntes oceânicas está sempre presente no levantamento, fazendo com que haja zonas com pouca informação e outras, com excesso de dados.

A regularização dos dados deve ser realizada porque etapas cruciais do processamento sísmico, tais como análise de velocidade, supressão de múltiplas e migração, melhoram seu desempenho se os dados de entrada estiverem distribuídos de maneira regular na linha sísmica, seja 2D ou 3D.

Neste trabalho, tais processos de interpolação e regularização dos dados são realizados pela transformada $\tau - p$.

A metodologia usada para realizar a transformada $\tau - p$, neste trabalho, é o empilhamento oblíquo no domínio da frequência. Algumas considerações sobre amplitude e forma do sinal reconstituído são feitas para os casos 2D e 3D. Porém, esta dissertação tem o enfoque cinemático,

procurando entender a natureza dos artefatos criados pelo operador da transformada $\tau - p$ e estudando a melhor maneira de minimizá-los, seja por ponderadores adequados, ou por estudos de controle de falseamento.

Na primeira etapa deste trabalho, a transformada $\tau - p$ 2D é estudada. Discute-se desde a parametrização p necessária para se obter uma reconstituição satisfatória do sinal (após a transformada direta e inversa), até os artefatos criados pela transformada, como marcas de borda e falseamento do sinal. Também mostram-se exemplos de dados sintéticos que simulam a deriva de cabo de hidrofones e a ausência de informação em trechos de linha sísmica e sua regularização após a transformada.

Por fim, o algoritmo da transformada $\tau - p$ 3D é discutido, como também a parametrização ideal para executar o par de transformadas. Também é discutida uma forma de regularização de um exemplo 3D de deriva de cabos de hidrofones.

Os algoritmos das transformadas $\tau - p$ 2D e 3D e a geração dos sismogramas sintéticos são feitos em linguagem C, os cálculos do empilhamento oblíquo são realizados em Fortran, as imagens são visualizadas e algum processamento, como correção NMO, seleção de traços, ganho, etc. são realizados com o pacote livre SU (Seismic Unix) do CWP (Center of Wave Phenomena).

Capítulo 2

A transformada $\tau - p$ 2D

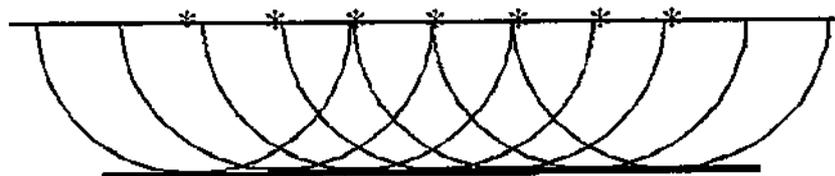
2.1 Decomposição de um campo de ondas registrado em um conjunto de ondas planas

Um campo de ondas registrado pode ser decomposto, pelo princípio da superposição, em um conjunto de ondas planas para vários ângulos de incidência arbitrários. Tais ondas planas possuem uma estrutura relativamente mais simples que a de um campo de ondas registrado na superfície da Terra, gerado por uma fonte pontual (Treitel, 1982). Desse modo, um problema complexo que envolve o estudo de um campo de ondas registrado pode ser “reduzido” ao estudo de várias ondas de estruturas mais simples.

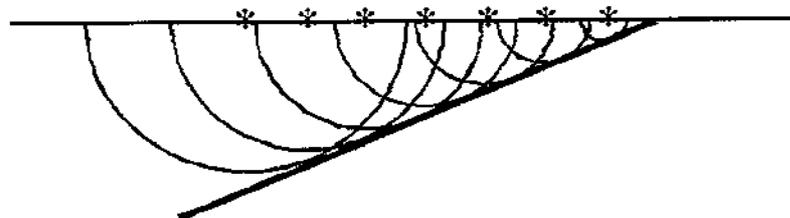
A decomposição de um campo de ondas bidimensional em suas componentes de ondas planas pode ser realizada de várias maneiras. Uma das mais usadas é a Transformada de Fourier 2D. Outra maneira de se obter os componentes de ondas planas é através da Transformada $\tau - p$, onde o dado original, no domínio $t - x$, passa para o domínio tempo de interseção, τ , e parâmetro do raio, p .

As ondas planas não existem na prática (Treitel, 1982). Sabe-se que uma fonte pontual num meio tridimensional homogêneo e isotrópico gera um campo de ondas esférico. Porém, as ondas planas podem ser geradas, aproximadamente, a partir da superposição de vários pontos de tiros distribuídos de forma regular na superfície da Terra e detonados simultaneamente (onda plana com incidência vertical), Fig. 2.1a, ou detonados em determinados intervalos de tempo regulares (onda

plana que viaja com um certo ângulo da vertical), Fig. 2.1b. A esses arranjos de linhas de tiros chamam-se fontes lineares em oposição às fontes pontuais.



a) Onda plana com incidência vertical



b) Onda plana inclinada

Adaptado de notas de aula Geofísica de Reservatórios I. Prof. Rodrigo Portugal

Figura 2.1: Geração de ondas planas. (a) Onda plana de incidência vertical. Os tiros, simbolizados por “*”, são detonados simultaneamente. (b) Onda plana inclinada. Os tiros são detonados da esquerda para a direita.

Apesar de o conhecimento da técnica da decomposição em ondas planas (transformada Radon) datar do início do século passado (1917), ela vem sendo rediscutida a partir do avanço das técnicas de aquisição de dados sísmicos de reflexão, com intervalos de amostragem entre os receptores pequenos e lanços cada vez maiores. Esses novos parâmetros de campo (intervalos entre receptores menores que 25m e lanços superiores a três quilômetros) são favoráveis a uma

adequada decomposição em ondas planas, inserindo menos artefatos no dado reconstituído (dado em que foram aplicadas as transformadas $\tau - p$ direta e inversa).

Além de simplificar o problema de inversão de um campo de ondas esférico, proveniente de uma fonte pontual, algumas etapas do processamento sísmico podem ser tratadas no domínio $\tau - p$, dentre as quais podem-se citar:

- Filtragem no domínio $\tau - p$ para atenuação de determinadas ondas sísmicas, tais como as ondas S, ou ruídos coerentes, tais como o “Ground Roll” (Stoffa, 1989).
- Análise de velocidades.
- Supressão de múltiplas.
- Migração.
- Interpolação de dados.
- Regularização de dados (dados amostrados irregularmente ou com ausência de informação em determinados trechos da linha sísmica).

Este trabalho dá ênfase ao problema de interpolação e regularização de dados que afetam todos os tipos de aquisição sísmica (marítima, terrestre ou de transição), seja por obstáculos operacionais, ou por deriva de cabo de hidrofones, que ocorre em todos os dados marítimos.

Além disso, o método de implementação para a transformada $\tau - p$ é o empilhamento oblíquo. Tal método consiste na soma das amplitudes ao longo de retas no domínio $t - x$. O resultado obtido é representado por um ponto no domínio $\tau - p$. Logo, uma reta no domínio $t - x$ transforma-se em um ponto no domínio $\tau - p$ (Fig. 2.2). Exemplos da transformada $\tau - p$ de retas paralelas e concorrentes são vistos na Figura 2.3.

Deve ser ressaltado aqui a nomenclatura utilizada neste trabalho: chama-se, para simplificar, o dado que é submetido ao par de transformadas direta e inversa (ida para o domínio $\tau - p$ e volta para o domínio $t - x$) de dado reconstituído. Quando somente a transformada direta for aplicada, quer dizer, o dado de saída estiver no domínio $\tau - p$, esse domínio é especificado para não causar dúvidas.

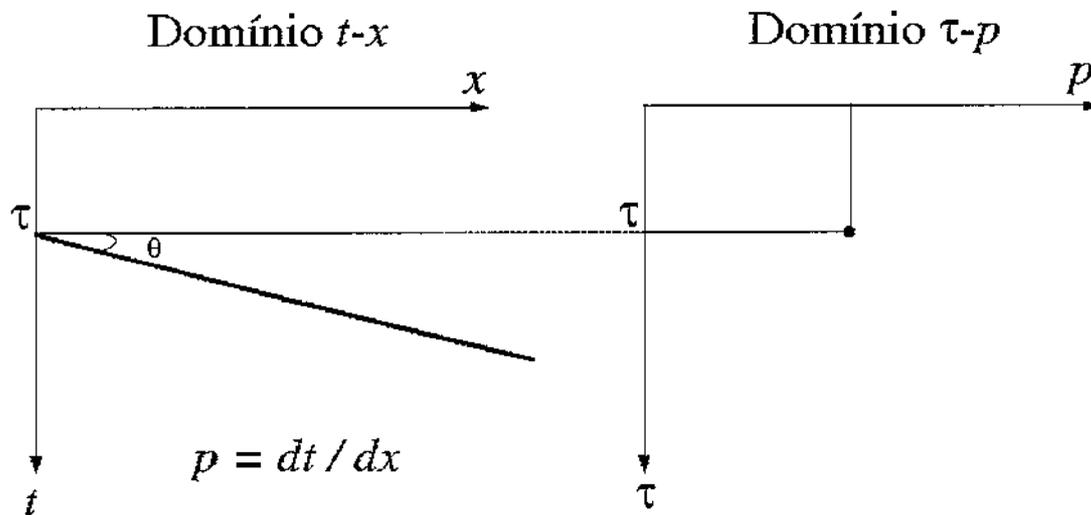
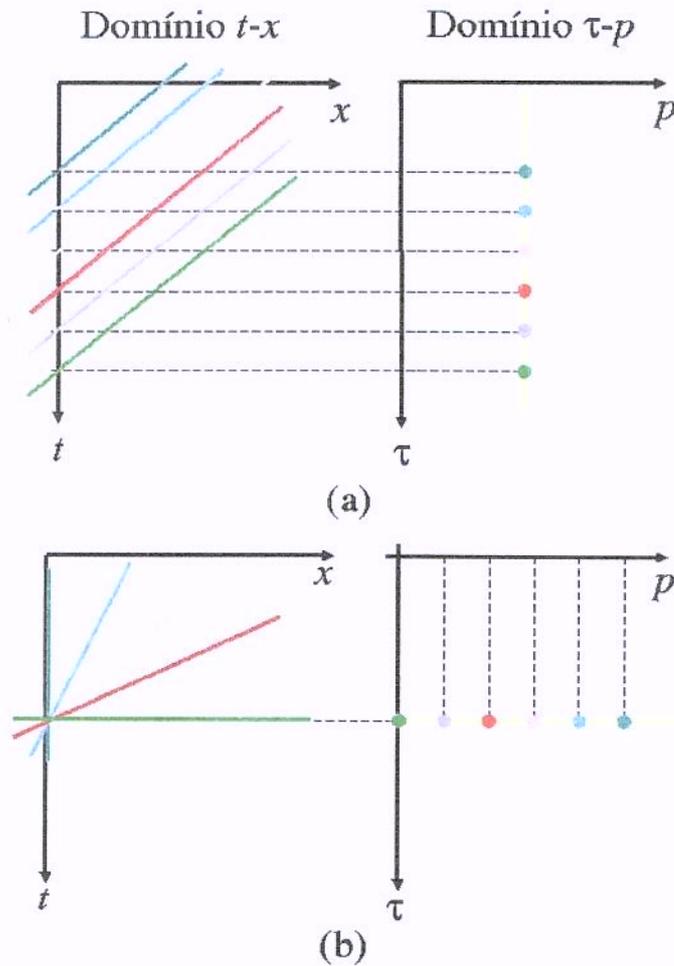


Figura 2.2: Transformada $\tau - p$ (a) Reta no domínio $t - x$ (b) Ponto no domínio $\tau - p$

São mostrados também os artefatos que podem ser observados no dado reconstituído, tais como falseamento e efeitos de borda. Esses efeitos indesejáveis são devidos à amostragem espacial e à limitação da abertura, respectivamente. Tais efeitos, atualmente, estão sendo minimizados por técnicas mais modernas de aquisição sísmica. Distorções na forma do pulso e nas amplitudes fizeram com que esse processo fosse útil apenas para estudos cinemáticos (Stoffa, 1989).

2.2 Empilhamento oblíquo

Para transformar o dado para o domínio $\tau - p$, pode ser utilizado o chamado *empilhamento oblíquo*, que consiste na soma do dado sísmico – uma família de afastamento comum, por exemplo – ao longo de retas, cujas inclinações são os parâmetros de raio p . Para somar o dado sísmico no domínio do afastamento ao longo de uma reta de inclinação p , cada traço de entrada sofre um deslocamento em tempo constante $\Delta\tau$, que depende de p e da posição do traço, x . Em seguida, somam-se esses traços deslocados para produzir um único traço de saída correspondente àquele valor de p (Fig. 2.4).



Adaptado de notas de aula Geofísica de Reservatórios I. Prof. Rodrigo Portugal

Figura 2.3: Transformada $\tau - p$ (a) Feixe de retas paralelas (b) Feixe de retas concorrentes

As ondas planas, representadas por retas no caso 2D, podem ser representadas pela equação:

$$t = \tau + px,$$

onde p é uma inclinação qualquer, x é o afastamento ou posição do traço, t é o tempo de trânsito e τ é o tempo de interseção ou tempo de intercepto. A partir da equação acima, pode-se definir o deslocamento linear

$$\Delta\tau = t - \tau = px,$$

que será aplicado a cada traço, correspondente ao seu afastamento x para um determinado valor p .

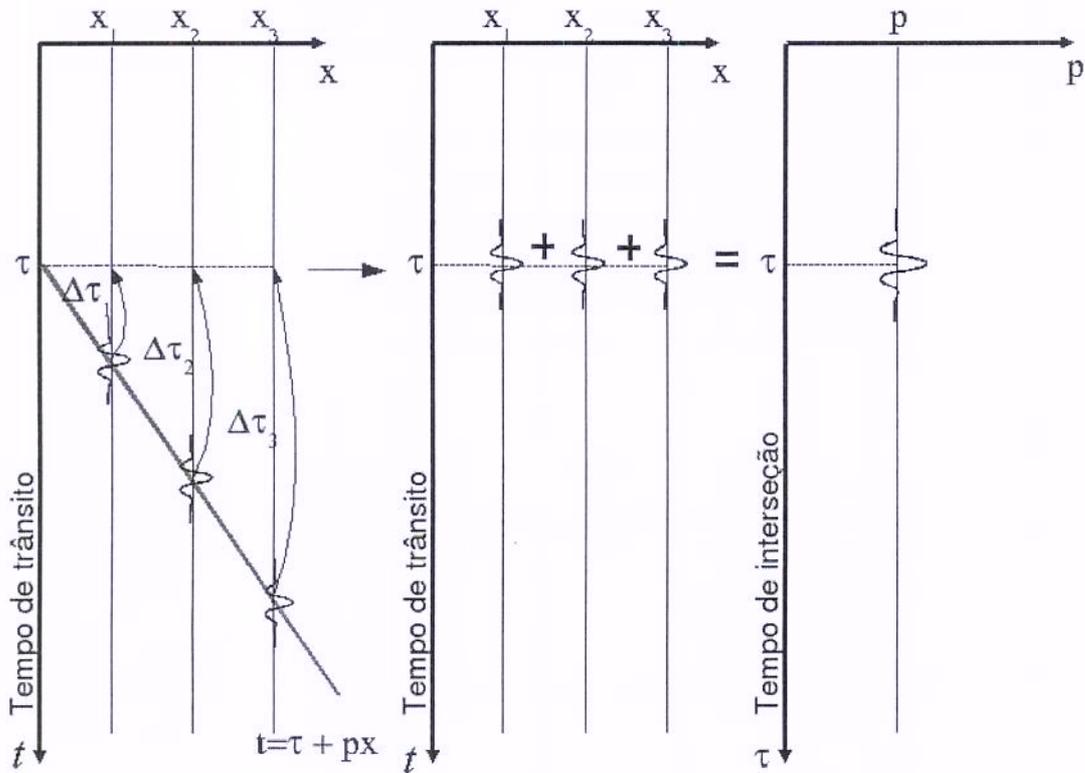


Figura 2.4: Exemplo esquemático do Empilhamento Oblíquo para um valor de p . Da esquerda para direita: deslocamentos no tempo para cada traço, soma dos traços e o resultado da soma é depositado em um ponto no domínio $\tau - p$.

Após o deslocamento linear com parâmetro p , um evento com mergulho original p ficará plano horizontal. O empilhamento horizontal é feito após cada traço de entrada ser deslocado, somando esses traços ao longo do eixo da coordenada espacial x . Esse processo é repetido para vários valores de p (Fig. 2.5).

Todo esse processo pode ser representado pela seguinte equação (Chapman, 1981):

$$V(\tau, p) = \int_{-\infty}^{\infty} u(\tau + px, x) dx, \quad (2.1)$$

onde, $V(\tau, p)$ é o dado no domínio $\tau - p$ após a transformada $\tau - p$ do dado de entrada $u(t, x)$, τ é o tempo de interseção da reta no eixo dos tempos, p é a inclinação da reta e x é a posição do traço do dado de entrada.

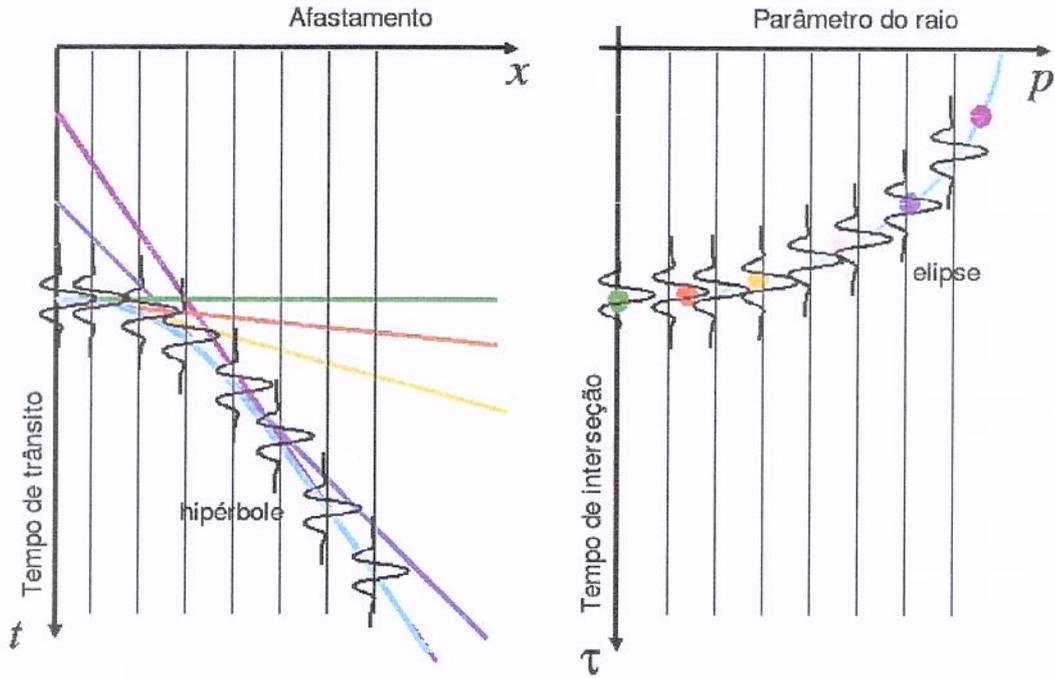


Figura 2.5: Transformada Tau-p. Os dados no domínio $t - x$ são somados ao longo de retas e o resultado é depositado no domínio $\tau - p$. Um evento hiperbólico no domínio $t - x$ se transforma num evento elíptico no domínio $\tau - p$.

A transformada inversa é dada por (Chapman, 1981):

$$u(t, x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} U(t - px, p) dp, \quad (2.2)$$

onde, $U(\tau, p)$ representa a derivada em tempo da transformada de Hilbert do dado $V(\tau, p)$. Como esta operação não depende de p , pode ser separada da integral e é equivalente à convolução com o *filtro rho* no domínio do tempo (Claerbout, 1985):

$$u(t, x) = \rho(t) * \int_{-\infty}^{\infty} V(t - px, p) dp,$$

onde $\rho(t)$ é a transformada inversa de Fourier da função $|\omega|/2\pi$, chamada de *filtro rho* ou filtro rampa e o sinal “*” indica uma operação de convolução.

Claerbout menciona um novo ponto de vista para o *filtro rho*, que é usado neste trabalho. O filtro rho pode ser dividido em duas partes: com metade aplicada à transformada direta e metade

aplicada à transformada inversa. A descrição do algoritmo (Seção 2.5) mostra como foi aplicado o *filtro rho*. Tal procedimento reconstitui de maneira adequada a amplitude e a fase do sinal quando o dado é reconstituído. A Figura 2.6, compara um traço do modelo de entrada com os mesmos traços dos dados reconstituídos sem e com a aplicação do *filtro rho*.

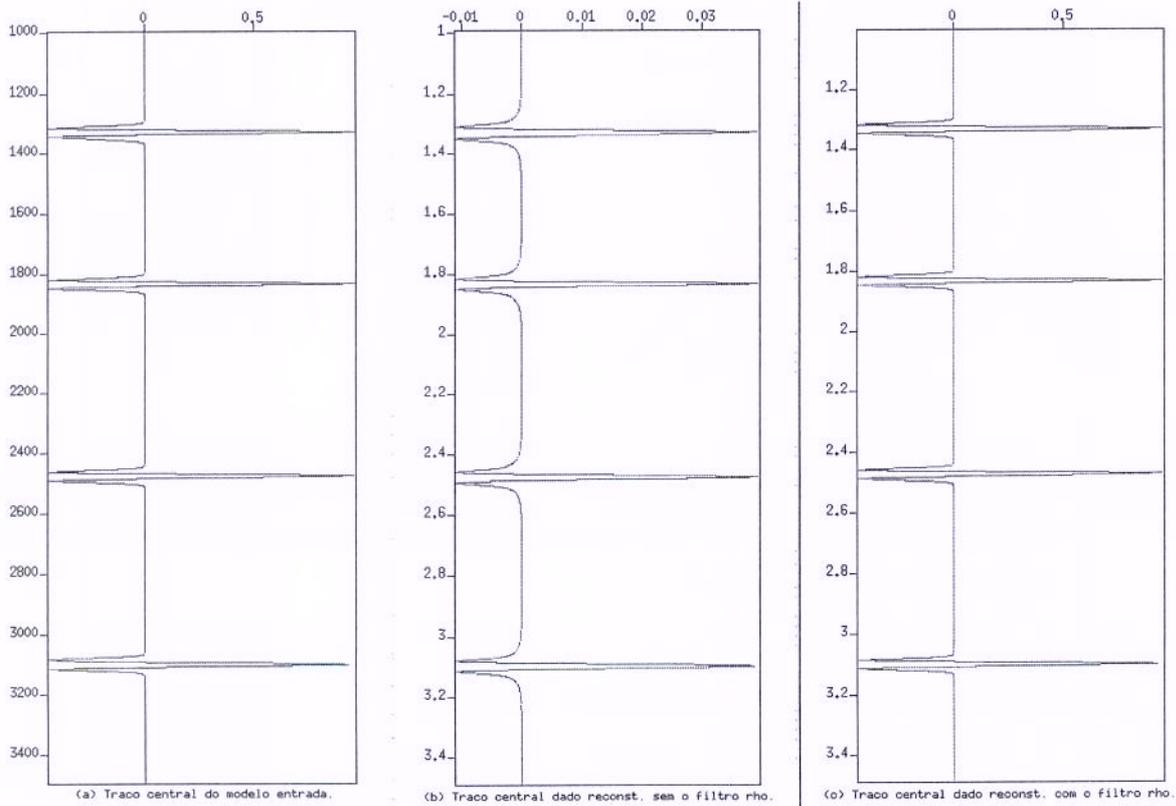


Figura 2.6: (a) Traço central de entrada, tempo em ms. (b) Traço central do dado reconstituído sem a aplicação do *filtro rho*, tempo em s; (c) Traço central do dado reconstituído com a aplicação do *filtro rho*, tempo em s.

A aplicação e a reversibilidade da transformada $\tau - p$ pressupõem que as operações se realizem com uma abertura infinita, isto é, o domínio da integral em (2.1) é toda a reta. No entanto, como os afastamentos possuem intervalos limitados, a operação de ida e volta da transformada introduz artefatos indesejáveis, como falseamento e efeito de borda no dado sísmico. Tais artefatos serão mostrados nos testes realizados com dados sintéticos.

2.3 Considerações sobre a amplitude do sinal

O empilhamento oblíquo 2D, tal como descrito na seção anterior, representa a decomposição de ondas planas de uma fonte linear. Shultz e Claerbout (1978) notaram que para fontes pontuais tal empilhamento oblíquo simula uma frente de onda cônica com o eixo horizontal e não uma frente de onda plana. Treitel (1982) o denomina de *empilhamento oblíquo convencional* para distingui-lo do verdadeiro empilhamento oblíquo de uma fonte pontual (*empilhamento oblíquo correto*).

Os empilhamentos oblíquos convencional e correto não são processos idênticos, mas são processos relacionados. O algoritmo que calcula o empilhamento oblíquo convencional pode ser usado para decomposição em ondas planas de uma fonte pontual se uma função peso for aplicada (Mithal e Vera, 1987). Lembrando novamente que as equações (2.1) e (2.2) do empilhamento oblíquo só fornecem a decomposição em ondas planas quando se trata de fontes lineares e ortogonais à linha sísmica.

Porém, para levantamentos sísmicos tridimensionais, uma verdadeira decomposição em ondas planas pode ser alcançada pela soma de todos os traços num arranjo areal, ao longo de planos paralelos de ângulos constantes e uma única direção arbitrária de mergulho (Treitel, 1982). Ou seja, o empilhamento oblíquo 3D semelhante ao calculado para o caso 2D na seção anterior (convencional) fornece de fato uma verdadeira decomposição em ondas planas.

Como a ênfase desse trabalho é o estudo da transformada $\tau - p$ 3D, o algoritmo da transformada $\tau - p$ 2D não levou em consideração a função peso, pois espera-se que a transformada de dados areais represente uma verdadeira decomposição em ondas planas de um modelo de fonte pontual. A descrição da função peso para o caso 2D pode ser vista em detalhe nos trabalhos de Chapman (1981) e Treitel (1982), a respeito da decomposição em ondas planas de fontes pontuais em meios tridimensionais.

2.4 Transformada $\tau - p$ por Transformada de Fourier

No empilhamento oblíquo, para cada reta de inclinação p , cada traço no domínio $t - x$, correspondente a uma determinada posição (ou afastamento), sofrerá um deslocamento constante. Desta maneira, pode-se valer da propriedade do deslocamento no tempo da Transformada de Fourier (Apêndice A).

Uma vez calculados os deslocamentos em tempo $\Delta\tau$ e a transformada de Fourier do dado de entrada $\hat{u}(\omega, x_k)$, basta multiplicá-la pela fase $e^{-i\omega\Delta\tau}$ no domínio da frequência. Assim, discretizando a equação (2.1), tem-se:

$$V(\tau, p) = \sum_{k=1}^n u(\tau + px_k, x_k) \Delta x. \quad (2.3)$$

Usando a propriedade do deslocamento da Transformada de Fourier:

$$\mathcal{F}\{u(\tau + px_k, x_k)\} = e^{-i\omega px_k} \hat{u}(\omega, x_k);$$

$$u(\tau + px_k, x_k) = \mathcal{F}^{-1}\{e^{-i\omega px_k} \hat{u}(\omega, x_k)\}. \quad (2.4)$$

Substituindo a equação (2.4) em (2.3), tem-se:

$$V(\tau, p) = \sum_{k=1}^n \mathcal{F}^{-1}\{e^{-i\omega px_k} \hat{u}(\omega, x_k)\} \Delta x$$

ou ainda,

$$V(\tau, p) = \mathcal{F}^{-1}\left\{\sum_{k=1}^n e^{-i\omega px_k} \hat{u}(\omega, x_k)\right\} \Delta x,$$

onde, os deslocamentos em tempo são $\Delta\tau_k = px_k$.

2.5 Descrição do algoritmo

As principais etapas do algoritmo para transformada $\tau - p$ 2D são apresentadas nesta seção. A transformada desejada pode ser a direta (domínio $t - x$ para o $\tau - p$) ou inversa (domínio $\tau - p$

para o $t - x$). Aqui é descrita a transformada direta, entretanto os mesmos princípios podem ser aplicados à transformada inversa. Lembrando que, para a transformada inversa, o dado de entrada também está sendo multiplicado, no domínio da frequência, por $\sqrt{\frac{|\omega|}{2\pi}}$.

1. Entrada: dado organizado por tiro comum ou CMP ("commom-mid-point").
2. Aplica-se a transformada de Fourier em relação ao tempo do dado complexo. A saída é um dado complexo no domínio $\omega - x$.

$$\hat{u}(\omega, x) = \mathcal{F}\{u(t, x)\}.$$

3. Controle de falseamento. Para cada parâmetro do raio p , é calculada a maior frequência para que o dado não seja falseado, como descrito na Seção 3.1.
4. Para cada parâmetro do raio p , são calculados os deslocamentos em tempo ($\Delta\tau$) que são invariantes para cada traço na posição x .

$$\Delta\tau = px.$$

5. Realiza-se o empilhamento oblíquo no domínio da frequência $\omega - x$, utilizando a propriedade do deslocamento da transformada de Fourier descrita no Apêndice A. Sendo assim, o dado passa do domínio $\omega - x$ para $\omega - p$.

$$\tilde{V}(\omega, p) = \sqrt{\frac{|\omega|}{2\pi}} \sum_k e^{-i\omega p x_k} \hat{u}(\omega, x_k) \Delta x.$$

6. Aplica-se a transformada inversa de Fourier, o dado passa do domínio $\omega - p$ para $\tau - p$.

$$V(\tau, p) = \mathcal{F}^{-1}\{\tilde{V}(\omega, p)\}.$$

Capítulo 3

Parametrização e testes da transformada

$\tau - p$ 2D

Neste capítulo, são estudados os seguintes efeitos por meio de testes com sismogramas sintéticos:

- Estudos de falseamento.

Neste tópico, os parâmetros p ideais para se evitar o falseamento de dados na transformada são discutidos. Também é mostrada a transformada $\tau - p$ aplicada a dados com falseamento espacial (efeito que aparece quando a distância entre traços Δx está mal dimensionada na aquisição sísmica).

- Testes de interpolação de dados.

Os dados que foram amostrados regularmente são transformados para o domínio $\tau - p$, de modo que o dado de saída da transformada inversa (reconstituído) possua intervalo de amostragem diferente do dado de entrada.

- Testes de regularização de dados.

Dois tipos de dados amostrados irregularmente são estudados:

- Dados com ausência de um longo trecho de traços, simulando um obstáculo operacional.
- Dados com intervalo de amostragem espacial irregular, simulando deriva de cabo de hidro-

fonos, porém utilizando um lanço bipartido simétrico (hidrofonos em ambos os lados do tiro).

O modelo usado para gerar todos os sismogramas sintéticos possui as seguintes características: Quatro camadas plano-paralelas com velocidades constantes, descritas na tabela abaixo e vistas na Figura 3.1. Abaixo da camada quatro, considera-se um semi-espaço de velocidade 4000m/s

Camada	Espessura	Velocidade
1	1000m	1500 m/s
2	500m	2000 m/s
3	800m	2500 m/s
4	1000m	3200 m/s

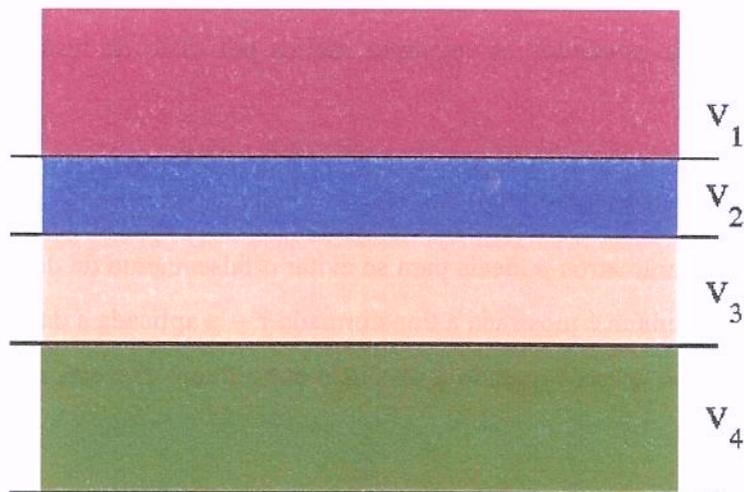


Figura 3.1: Modelo de camadas planas e horizontais com velocidades constantes.

Todas as seções de sismogramas, aqui chamadas simplesmente de sismogramas, foram geradas com um pulso da fonte do tipo Ricker de 72ms de duração. Foram gerados vários sismogramas de tiro comum para os testes de falseamento, interpolação e regularização:

- Sismograma $\Delta x = 50\text{m}$ (os dois eventos de reflexão mais rasos estão falseados):
lanço: -2000m a 2000m

$\Delta x : 50 \text{ m}$

$nx : 81$

- Sismograma $\Delta x = 25\text{m}$:

lanço: -2000m a 2000m

$\Delta x : 25 \text{ m}$

$nx : 161$

- Sismograma $\Delta x = 12,5\text{m}$:

lanço: -2000m a 2000m

$\Delta x : 12,5 \text{ m}$

$nx : 321$

Nas subseções deste capítulo, são mostrados alguns exemplos e testes com o uso do algoritmo que calcula as transformadas $\tau - p$ 2D, direta e inversa.

3.1 Falseamento

No empilhamento oblíquo, as amostras são somadas ao longo de retas cujas inclinações são os parâmetros de raio p . Portanto, cada traço no domínio $\tau - p$ representa a soma de traços sísmicos ao longo de retas de diferentes inclinações. Pelo princípio da superposição (propriedades aditivas do espectro de Fourier), cada traço no domínio $\tau - p$ pode conter somente as frequências temporais contidas no traço sísmico. Logo, a amostragem em τ é também regida pela condição de Nyquist (Teoria da Amostragem) no domínio do tempo de trânsito (Turner, 1990):

$$f_{\text{NYQ}} = \frac{1}{2\Delta t} = \frac{1}{2\Delta\tau}.$$

O falseamento discutido neste trabalho é aquele gerado por amostragens inadequadas nas direções p e x , isto é, nos domínios espaciais. O deslocamento em tempo que cada traço de entrada sofre antes da soma está relacionado com o novo intervalo em tempo entre as amostras. Este intervalo, neste trabalho, denominado de $\Delta\tau(\Delta x, p)$, depende de p e da distância entre traços de entrada, Δx , para a transformada direta. Para a transformada inversa, $\Delta\tau$ depende de x (inclinação da reta no domínio $\tau - p$) e Δp (Fig. 3.2).

Tem-se, para a transformada direta, que:

$$p = \frac{\Delta\tau}{\Delta x} \Rightarrow \Delta\tau(\Delta x, p) = p\Delta x.$$

Isso significa que quanto maior for o valor de p , maior é o $\Delta\tau$. Logo, menor é a frequência de Nyquist, que será calculada para cada traço e para cada valor de p .

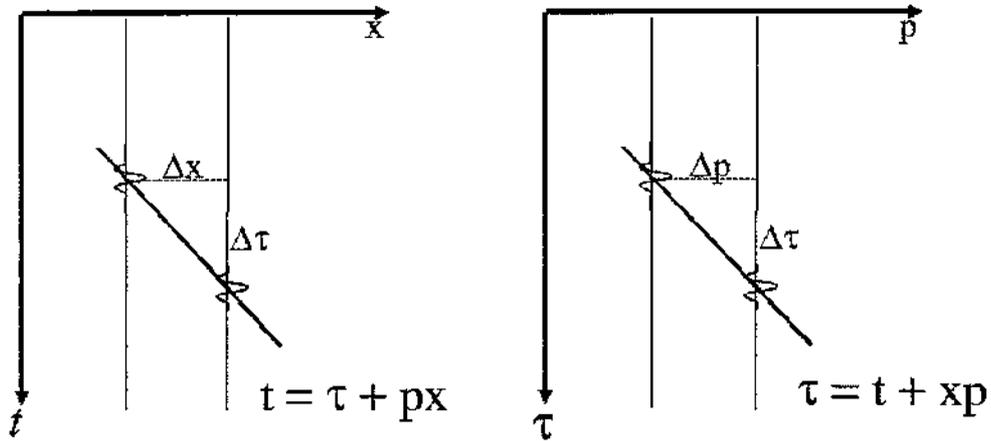
Segundo a teoria da amostragem, a frequência de Nyquist, para a transformada direta, é:

$$f_{\text{NYQ}}(\Delta x, p) = \frac{1}{2\Delta\tau(\Delta x, p)},$$

ou

$$f_{\text{NYQ}}(\Delta x, p) = \frac{1}{2p\Delta x}, \quad (3.1)$$

onde, p corresponde a inclinação da reta sobre a qual o empilhamento oblíquo está sendo calculado e Δx é o intervalo de amostragem espacial.



(a) Transformada direta (b) Transformada inversa

Figura 3.2: Falseamento espacial. (a) Transformada direta: $\Delta\tau$ depende da inclinação p e Δx ; (b) Transformada inversa: $\Delta\tau$ depende da inclinação x e Δp .

Correspondente, para a transformada inversa, a frequência de Nyquist é dada por:

$$f_{NYQ}(x, \Delta p) = \frac{1}{2x\Delta p}, \quad (3.2)$$

onde, x é a inclinação de uma reta no domínio $\tau - p$, sobre a qual o empilhamento oblíquo está sendo calculado e Δp é o intervalo de amostragem na direção p .

O controle de falseamento é realizado da seguinte maneira: para cada valor de p ou x é calculada uma frequência máxima, até a qual o empilhamento oblíquo será efetuado.

Os parâmetros p devem ser dimensionados para que os pontos no domínio $t - x$ sejam mapeados corretamente no domínio $\tau - p$.

Como regra geral, tem-se que o intervalo de p deve conter todos os mergulhos existentes no dado. Logo, para um registro de tiro comum marítimo, existem reflexões com valores de p positivos e negativos, assim como, para um dado cmp, há difrações com valores de p positivos e negativos:

$$p_{min} = -p_{max}, \quad p_{max} = \frac{1}{v_{hsup}},$$

onde, p_{min} e p_{max} são o menor e o maior valor de p , respectivamente e v_{hsup} é a velocidade de fase

horizontal superior (a velocidade da água para dados marítimos e velocidade da ZBV - Zona de Baixa Velocidade - para dados terrestres).

O incremento de p pode ser calculado por Nyquist:

$$\Delta p = \frac{1}{2X_I f_{max}},$$

onde, X_I é o intervalo dos valores de x , ou seja, o tamanho total do lanço, e f_{max} é a maior frequência presente no dado.

Há duas regras empíricas para o cálculo dos parâmetros p , uma sugerida por Yilmaz (1987) e outra sugerida por Turner (1990):

- Regra sugerida por Yilmaz:
 - Faz-se $np \approx nx$,
 - calcula-se $\Delta p = \frac{p_{max} - p_{min}}{np}$.
- Regra sugerida por Turner:
 - Relação quantitativa entre Δp e X_I :

$$\Delta p < \frac{1}{X_I f_{max}} \quad (3.3)$$

3.1.1 Controle de falseamento feito pelo algoritmo

O controle de falseamento é uma opção do algoritmo desenvolvido. Como foi visto acima, quanto maior o valor de p , menor é a frequência de Nyquist para a transformada direta.

As frequências máximas para cada valor de p (transformada direta) ou x (transformada inversa), até a qual o empilhamento oblíquo será realizado, são dadas pelas equações (3.1) e (3.2). Isso significa que haverá diferentes frequências máximas relativas a cada afastamento e a cada parâmetro do raio. Nota-se que essas frequências de Nyquist se referem ao falseamento espacial e não ao temporal.

3.1.2 Testes de falseamento

Dois tipos de falseamentos são estudados: os provenientes da parametrização em p inadequada (teste 1) e aqueles gerados a partir de um dado adquirido com parametrização em x incorreta

(teste 2). Ambos testarão o controle de falseamento utilizado no algoritmo.

Teste 1 - Falseamento em p

Foi utilizado o sismograma $\Delta x = 25\text{m}$. Os parâmetros em p calculados para que a reconstituição do dado para o domínio $t - x$ seja satisfatória são:

- $p_{max} = \frac{1}{v_{sup}} = \frac{1}{1500} = 0,000667\text{s/m}$.
- $p_{min} = -p_{max} = -0,000667\text{s/m}$.
- Δp calculado por Nyquist:

$$\Delta p = \frac{1}{2X_I f_{max}} = \frac{1}{2 \cdot 4000 \cdot 56} = 2,2310^{-6}\text{s/m}$$

onde utilizou-se uma frequência máxima de 56Hz que está presente no sismograma sintético de entrada (pulso Ricker de 72ms, $f_{max} \approx 4/T$).

- Número de parâmetros p :

$$np = \frac{(p_{max} - p_{min})}{\Delta p} + 1 = 599$$

- Δp calculado pela regra prática de Yilmaz:

$$\Delta p = \frac{(p_{max} - p_{min})}{nx} = \frac{(0,000667 + 0,000667)}{161} = 8,286 \cdot 10^{-6}\text{s/m} \implies np = 161$$

- Δp calculado pela regra prática de Turner:

$$\Delta p = \frac{1}{X_I f_{max}} = \frac{1}{4000 \cdot 56} = 4,46 \cdot 10^{-6}\text{s/m} \implies np = 299$$

A Figura 3.3 mostra o sismograma $t - x$, com $\Delta x = 25\text{m}$, utilizado como entrada para os testes das transformadas $\tau - p$ com diferentes parametrizações em p . Todos os sismogramas serão reconstituídos com $p_{min} = -p_{max} = -0,000667$, porém com diferentes valores de Δp e np . Serão vistos os dados reconstituídos com $np = 599$ (Nyquist), $np = 161$ (sugerido por Yilmaz), $np = 299$ (sugerido por Turner) e $np = 1335$ (acima de Nyquist).

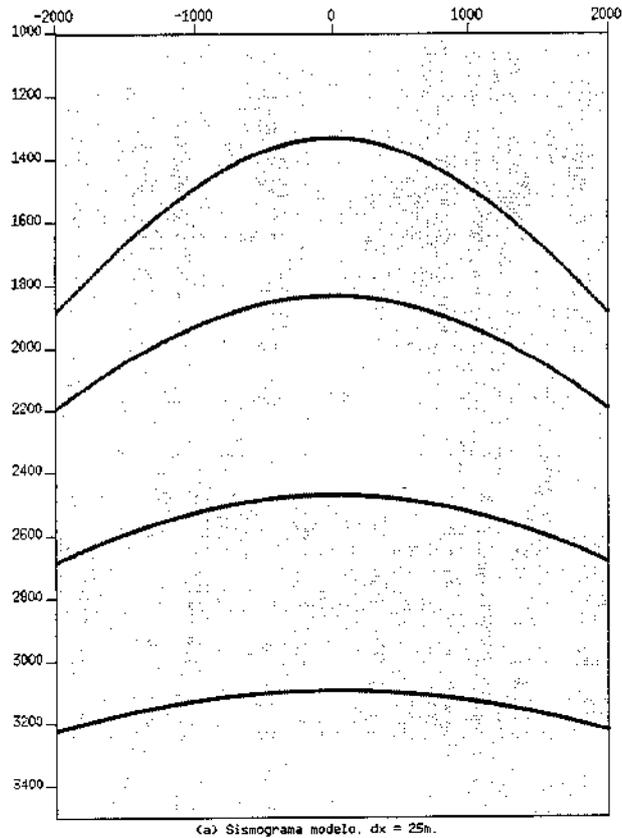


Figura 3.3: Sismograma proveniente do modelo de camadas planas horizontais, lanço: -2000m a 2000m, $\Delta x = 25\text{m}$ e $nx = 161$.

Os dados no domínio $t - x$ que foram reconstituídos com diferentes parâmetros em p são vistos nas Figuras 3.4 e 3.5, todos reconstituídos com o controle de falseamento do algoritmo. A Figura 3.4 mostra o dado reconstituído com $np = 599$ - parâmetro calculado pela teoria da amostragem - e $np = 1335$, mais que o dobro do valor calculado por Nyquist. As diferenças entre eles são pequenas, e ocorrem, principalmente, como artefatos nos afastamentos maiores no dado reconstituído com $np = 599$. Não há diferenças visíveis na reconstituição dos eventos de reflexão.

A Figura 3.5 mostra os sismogramas reconstituídos com $np = 161$ - sugerido por Yilmaz - e $np = 299$, sugerido por Turner, ambos com o controle de falseamento. Nota-se que o primeiro, além de muitos artefatos (marcas do operador linear), não reconstituiu os eventos de reflexão satisfatori-

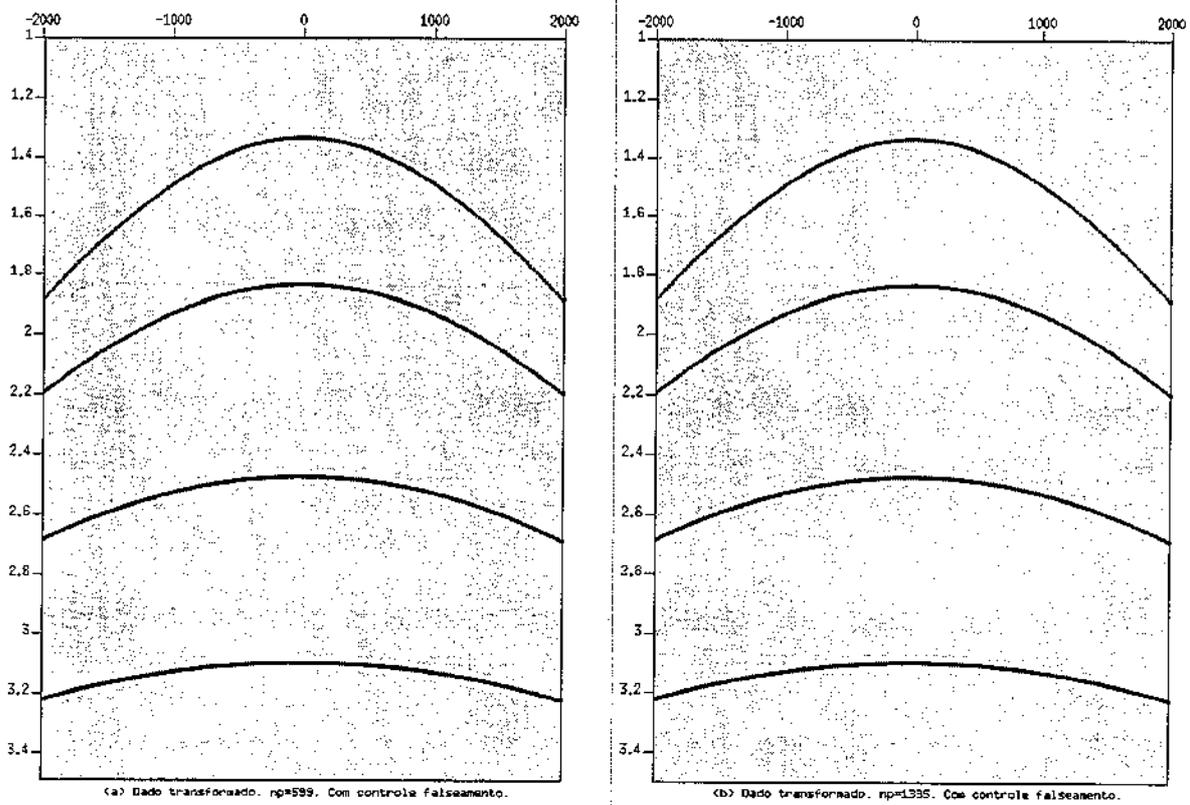


Figura 3.4: Sismogramas reconstituídos no domínio $t - x$, $\Delta x = 25\text{m}$. (a) Dado reconstituído, $np = 599$; (b) Dado reconstituído, $np = 1335$. Ambos com controle de falseamento.

amente. Isso pode ser observado pela frequência mais baixa em todos os eventos nos afastamentos longos (coincidentes com os maiores mergulhos). Na Figura 3.5b, tem-se os eventos de reflexão bem reconstituídos, embora contenha mais marcas do operador do que o dado reconstituídos com $np = 599$.

As observações anteriores referente às diferenças entre os dados reconstituídos com vários valores de np ficam mais evidentes quando são comparados os traços centrais de cada sismograma, pois eles possuem menos artefatos que os traços das extremidades do sismograma (efeitos de borda). Comparando este traço do modelo de entrada com os dos dados reconstituídos com $np = 1335$, $np = 599$, $np = 299$ e $np = 161$, nota-se um crescente aumento dos artefatos à medida que np diminui, porém todos os eventos estão reconstituídos satisfatoriamente (Figs. 3.6 e

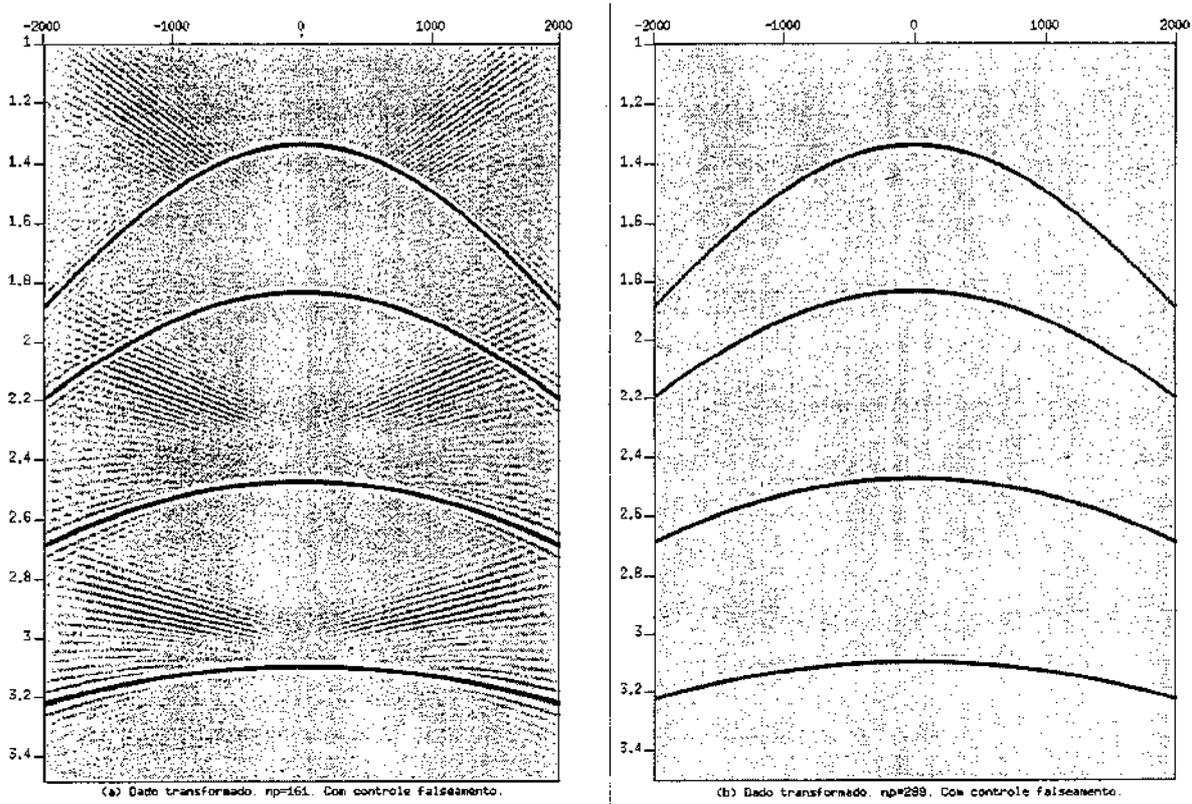


Figura 3.5: Sismogramas reconstituídos no domínio $t - x$, $\Delta x = 25\text{m}$. (a) Dado reconstituído, $np = 161$; (b) Dado reconstituído, $np = 299$. Ambos com controle de falseamento.

3.7).

Fazendo a mesma comparação anterior, mas com o traço da extremidade (primeiro traço de cada sismograma), nota-se que o dado reconstituído com $np = 161$ (sugestão de Yilmaz) não reconstituiu os eventos de forma satisfatória, o que não ocorre com todos os outros valores de np testados (Figs. 3.8 e 3.9). Também pode ser notada a perda de amplitude e frequência no dado reconstituído com $np = 161$ (Fig. 3.9c).

Conclui-se que os valores p sugeridos por Yilmaz não reconstituiu satisfatoriamente os eventos. Os eventos são reconstituídos de forma adequada com valores de np igual ou superior ao sugerido por Turner. A partir deste valor, à medida que np aumenta, menor é a quantidade de artefatos deixados pela transformada. A escolha de np , portanto, vai depender do tempo, dos re-

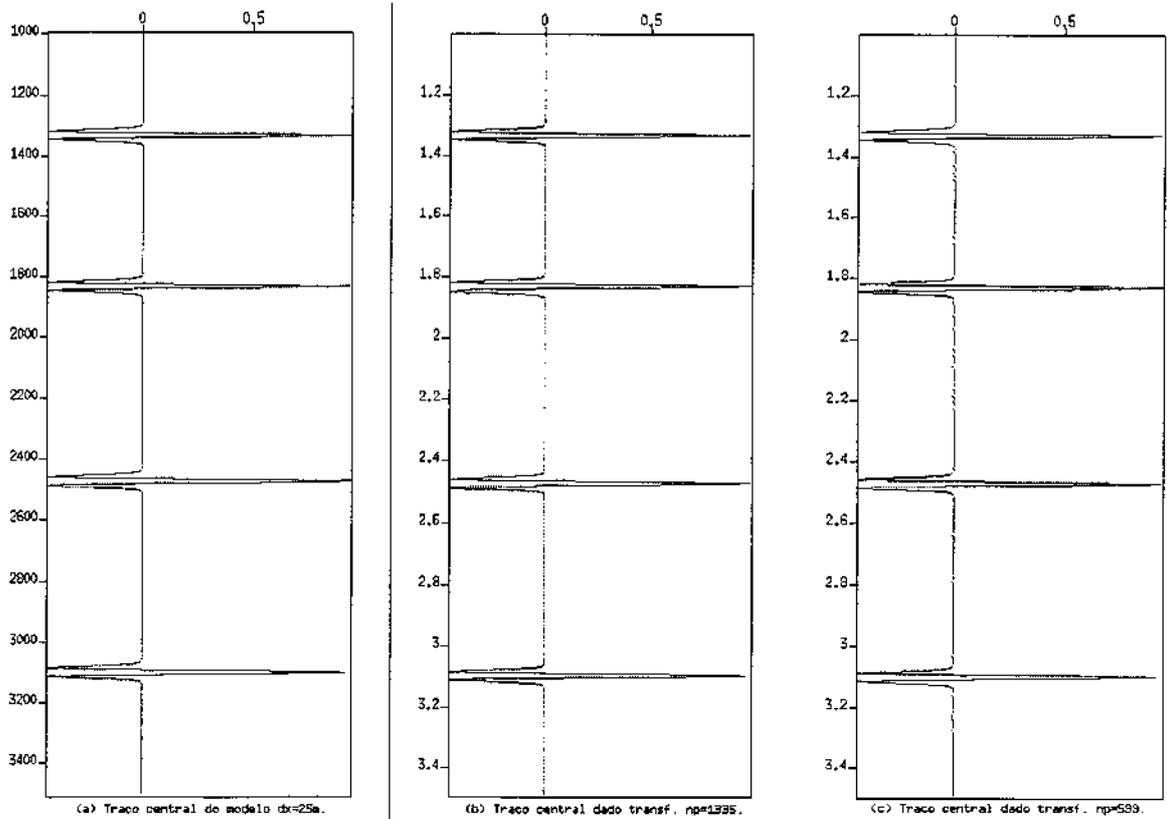


Figura 3.6: Traço central $nx = 81$. (a) Modelo $\Delta x = 25m$, tempo em ms. (b) Dado reconstituído, $np = 1335$; (c) Dado reconstituído, $np = 599$. (b) e (c) com controle de falseamento e escala temporal em s.

curso computacionais e da finalidade do usuário, uma vez que a quantidade de tempo requerida para este processo é fortemente relacionada com o número de amostras. O tempo de computação para as transformadas $\tau - p$, ida e volta, de um sismograma de tiro comum de 161 canais, razão de amostragem 4ms, 4s de tempo de registro e $np = 599$ é 1:46min. No entanto, para transformar o mesmo sismograma com $np = 299$ a duração é de 0:53min. Os cálculos foram executados num único processador PC de 1.8GHz.

Os dados reconstituídos com $np = 599$, com e sem controle de falseamento do algoritmo, são vistos nas Figuras 3.10a e 3.10b, respectivamente. Nota-se, aqui, que ambos possuem os eventos de reflexão bem reconstituídos, embora o dado sem o controle de falseamento mostre mais

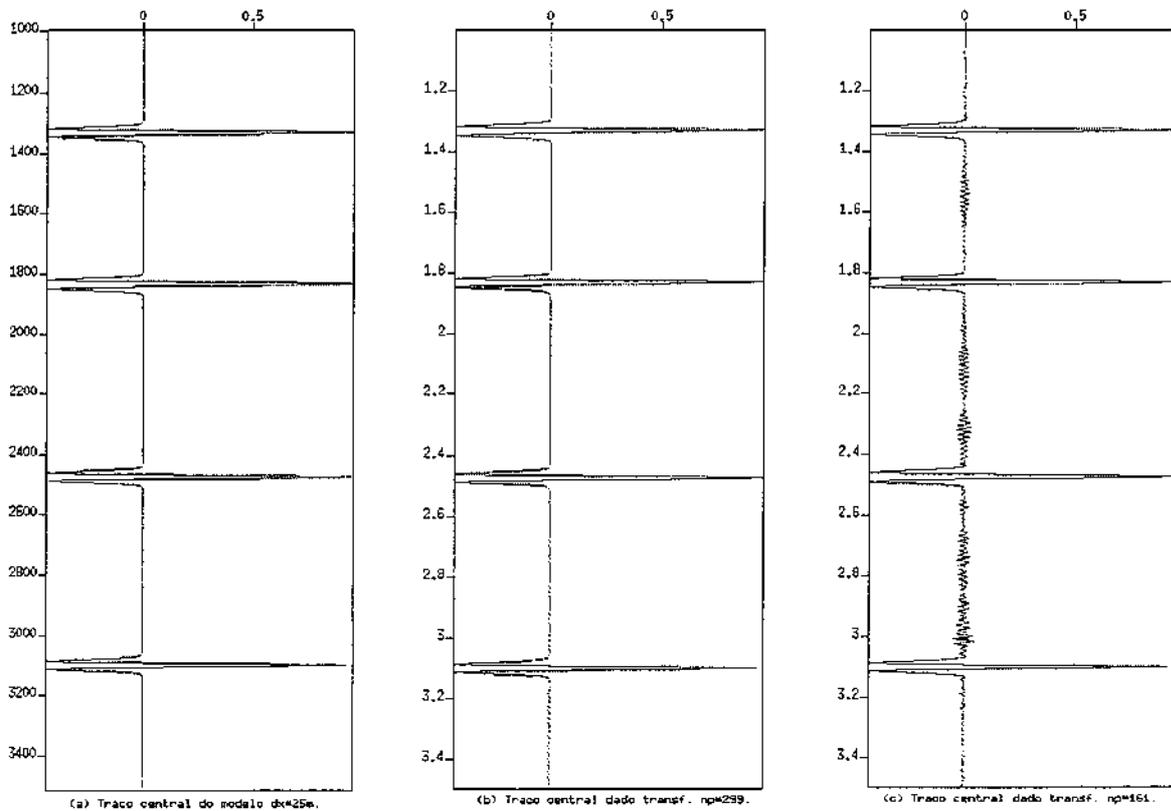


Figura 3.7: Traço central $nx = 81$. (a) Modelo $\Delta x = 25m$, tempo em ms. (b) Dado reconstituído, $np = 299$; (c) Dado reconstituído, $np = 161$. (b) e (c) com controle de falseamento e escala temporal em s.

artefatos, que aparecem devido ao fato de o empilhamento oblíquo ser calculado nas frequências maiores que a de Nyquist. A Figura 3.11 mostra a diferença entre os dois sismogramas.

É interessante notar a influência do controle de falseamento em dados com os parâmetros em p subdimensionados. A Figura 3.12 mostra o dado reconstituído com $np = 161$, com e sem controle de falseamento. O dado reconstituído com o controle mostra que a atuação deste acarreta um estiramento no pulso no domínio do tempo dos eventos de maior mergulho (nos dois eventos mais rasos, nos afastamentos mais longos) porque o controle atua impedindo que as frequências mais altas (superiores que a de Nyquist) entre no cálculo do empilhamento. Esse estiramento também é notado na Figura 3.5a.

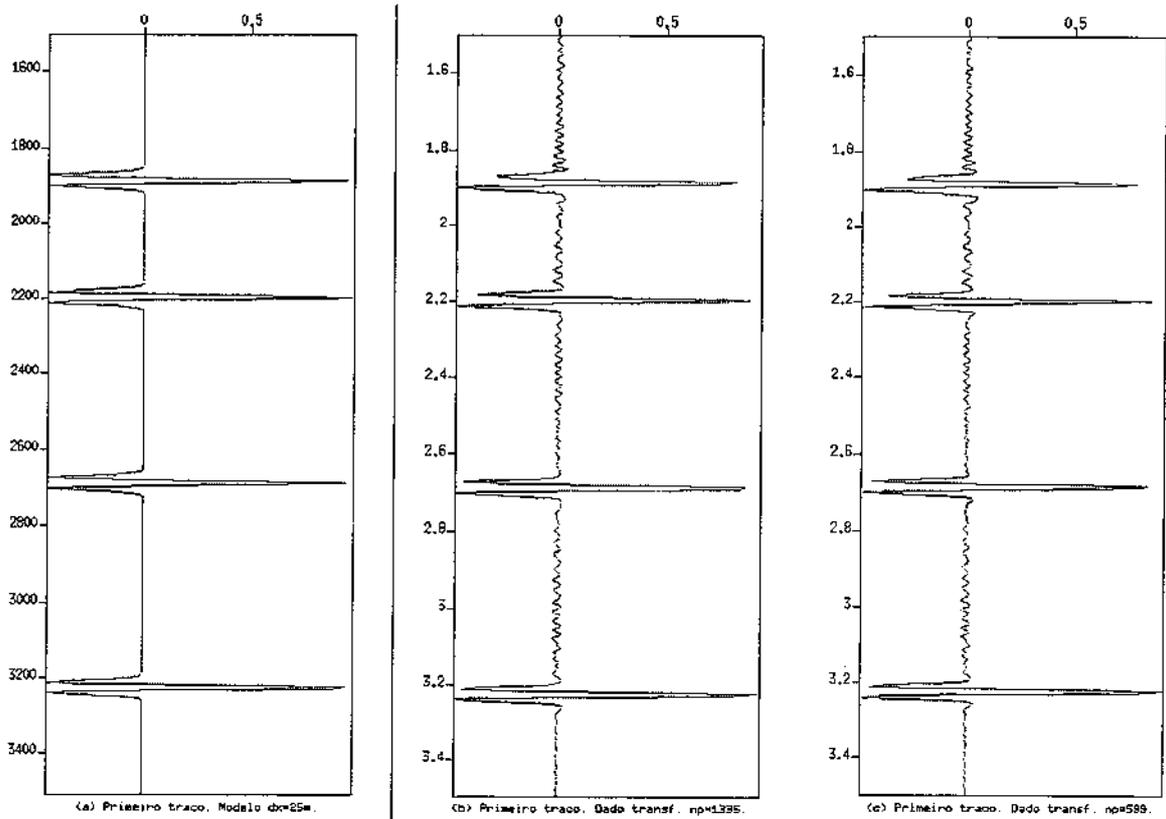


Figura 3.8: Primeiro traço $nx = 1$. (a) Modelo $\Delta x = 25m$, tempo em ms. (b) Dado reconstituído, $np = 1335$; (c) Dado reconstituído, $np = 599$. (b) e (c) com controle de falseamento e escala temporal em s.

Quando a transformada é realizada sem o controle de falseamento, o empilhamento oblíquo é feito para todas as freqüências, sem estiramento do pulso, porém deixando uma enorme quantidade de artefatos (Fig. 3.12b).

O estiramento dos eventos mergulhantes observado na transformada do dado com $np = 161$ com controle de falseamento é devido ao fato de o incremento em p ser grande, e com poucos valores de p já se atinge o limite das freqüências a partir da qual o empilhamento oblíquo não é mais realizado: $f_{NYQ} = \frac{1}{2p\Delta x}$. O número de parâmetros p ($np = 161$) é insuficiente para o cálculo da transformada no intervalo $-0,000667$ a $0,000667$, onde poucas retas contribuem para reconstituir o sismograma no domínio $t - x$, deixando a marca do operador linear.

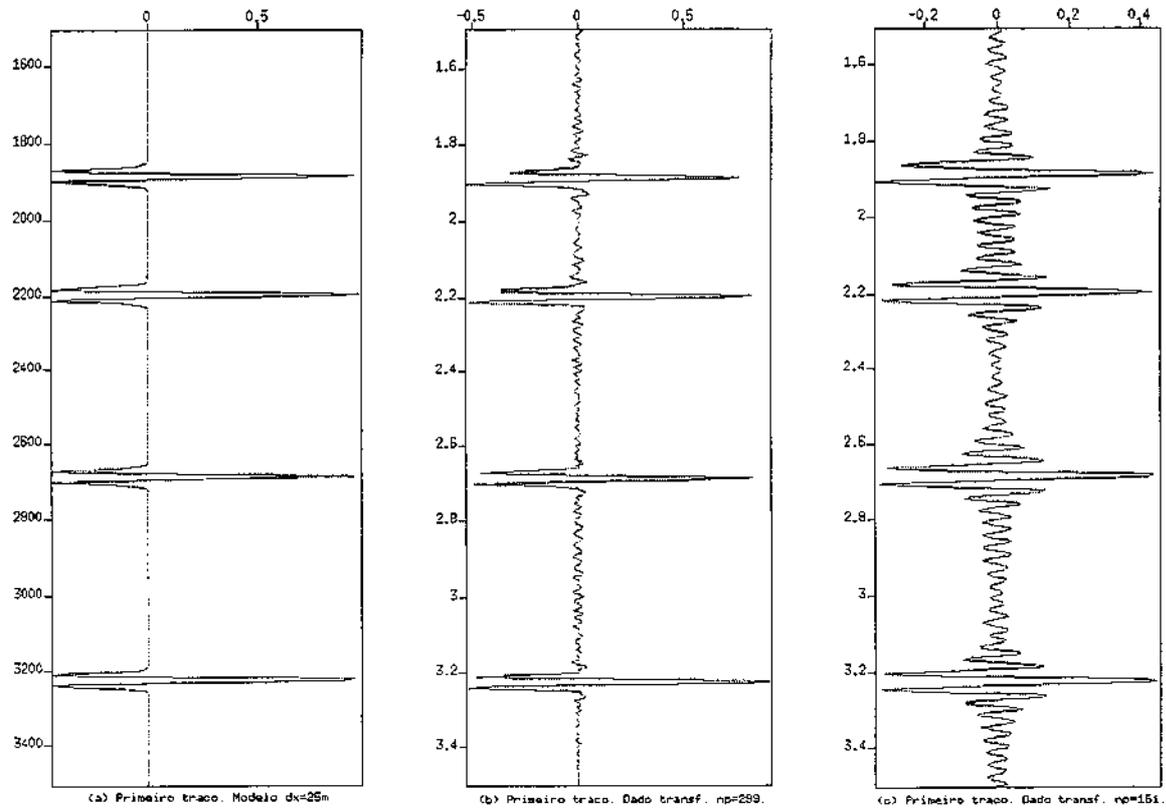


Figura 3.9: Primeiro traço $nx = 1$. (a) Modelo $\Delta x = 25m$, tempo em ms. (b) Dado reconstituído, $np = 299$; (c) Dado reconstituído, $np = 161$. (b) e (c) com controle de falseamento e escala temporal em s.

A Figura 3.13 mostra o dado no domínio $\tau - p$ transformado (transformada direta) com $np = 599$, com e sem controle de falseamento. Nota-se que o controle atuou no sentido de limitar a frequência máxima à medida que p aumenta, o que pode ser visto na Figura 3.13a, onde há uma diminuição das retas com valores elevados de p , que acarreta em uma reconstituição com menos artefatos. Na Figura 3.13b, o empilhamento oblíquo foi realizado para todas as frequências existentes no dado: $f_{max} = \frac{1}{2\Delta t}$.

Teste 2 - Falseamento em x

Para este teste será utilizado o sismograma que apresenta os dois eventos de reflexão mais rasos falseados, $\Delta x = 50m$ (Fig. 3.14). Os parâmetros p usados na transformada são aqueles que

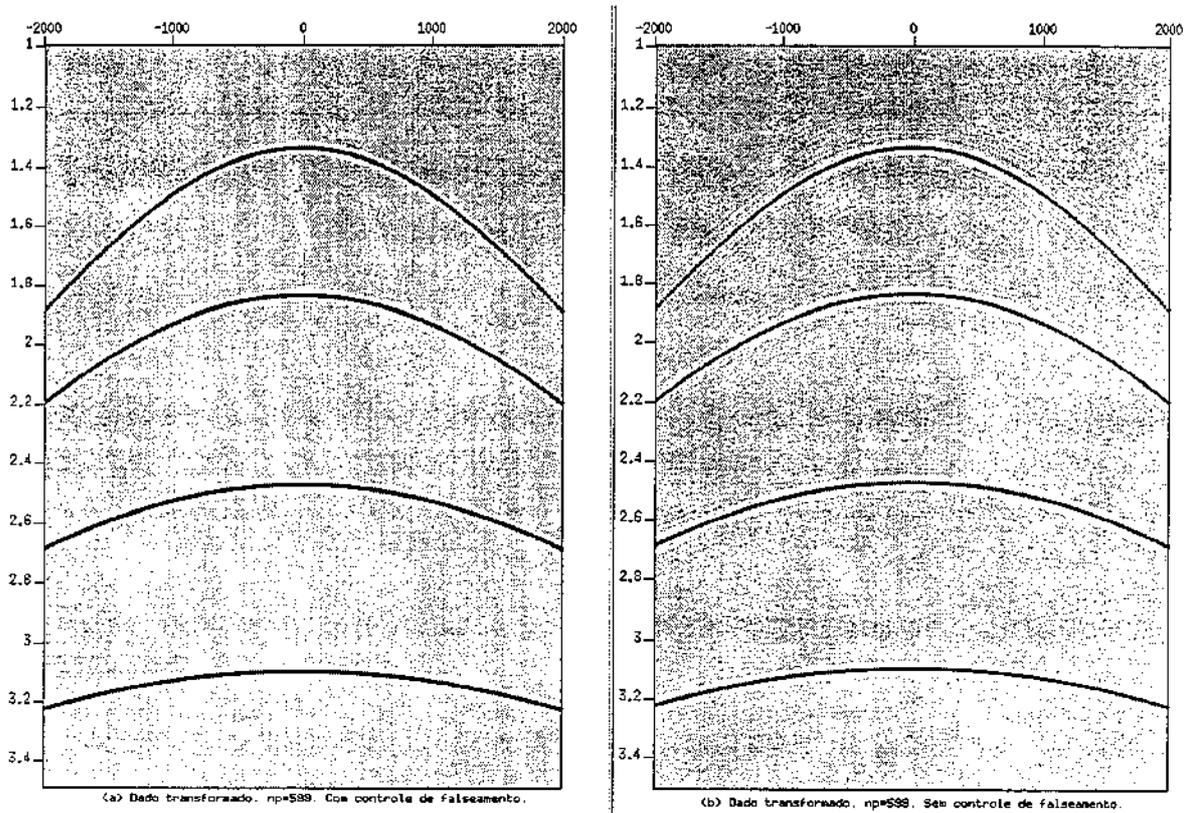


Figura 3.10: Sismogramas reconstituídos no domínio $t-x$, $\Delta x = 25\text{m}$. (a) Dado reconstituído com controle de falseamento; (b) Dado reconstituído sem controle de falseamento. Ambos reconstituídos com $np = 599$.

foram calculados por Nyquist ($np = 599$).

A Figura 3.15 mostra o sismograma $\Delta x = 50\text{m}$ reconstituído com e sem controle de falseamento. O dado reconstituído com controle de falseamento (Fig. 3.15a) restitui bem o dado original, pois o controle é feito tanto na transformada direta quanto na inversa.

É grande a diferença dos dados reconstituídos a partir do modelo $\Delta x = 25\text{m}$ e do modelo $\Delta x = 50\text{m}$, ambos sem controle de falseamento (comparar figuras 3.10b e 3.15b). Tal diferença ocorre porque, na transformada direta, o controle é dado por $f_{\text{NYQ}} = \frac{1}{2p\Delta x}$, portanto quando Δx for igual a 50m, o controle fica mais rigoroso, restringindo mais as frequências, que quando Δx for igual a 25m. O dado reconstituído sem o controle de falseamento (Fig. 3.15b) mostra que o

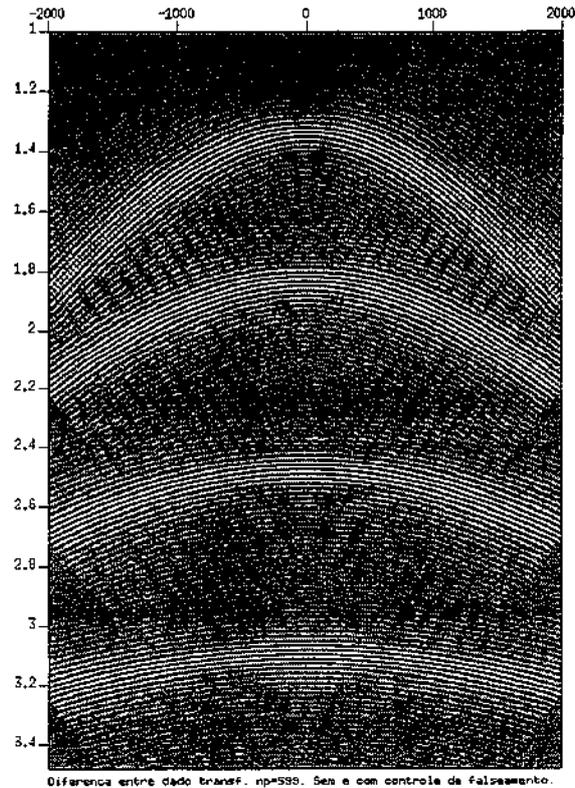


Figura 3.11: Sismograma diferença entre o modelo $\Delta x = 25\text{m}$ reconstituído com $np = 599$ sem o controle de falseamento e com este controle. Maior ganho.

empilhamento oblíquo calculado nas frequências superiores à f_{NYQ} introduziu um falseamento na transformada inversa, apesar das reflexões estarem ainda bem definidas no domínio $\tau - p$ (Fig. 3.16).

3.1.3 Conclusões

Algumas conclusões podem ser tiradas a partir desses testes:

- O intervalo de amostragem Δp sugerido por Turner pode ser usado como um limite superior (maiores que este valor, os eventos não são reconstituídos satisfatoriamente):

$$\Delta p < \frac{1}{X_I f_{max}}$$

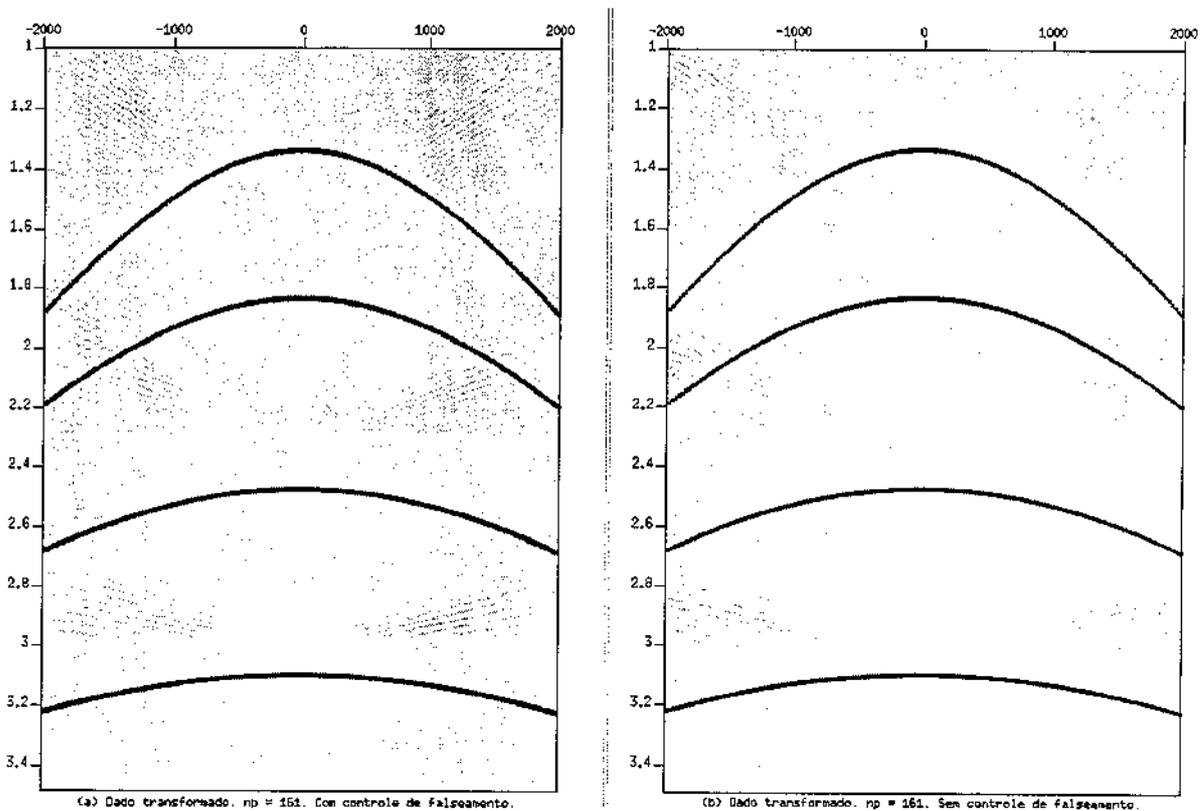


Figura 3.12: Sismogramas reconstituídos no domínio $t-x$, $\Delta x = 25\text{m}$. (a) Dado reconstituído com controle de falseamento; (b) Dado reconstituído sem controle de falseamento. Ambos reconstituídos com $np = 161$.

- O superdimensionamento de np (acima do valor calculado por Turner), não melhora a reconstituição dos eventos, apenas pode diminuir um pouco os artefatos (Figs. 3.8 e 3.9). O valor de np a partir do sugerido por Turner vai depender do objetivo da transformada, do tempo e dos recursos computacionais disponíveis.
- Os dados devem estar com os parâmetros em p dimensionados corretamente para que o controle de falseamento do algoritmo atue adequadamente.

O controle de falseamento para o dado reconstituído com os parâmetros em p adequados atuou no sentido de diminuir os artefatos no dado, sem prejudicar a reconstituição dos eventos. Já no dado com a parametrização em p mal dimensionada ($np = 161$), o controle de

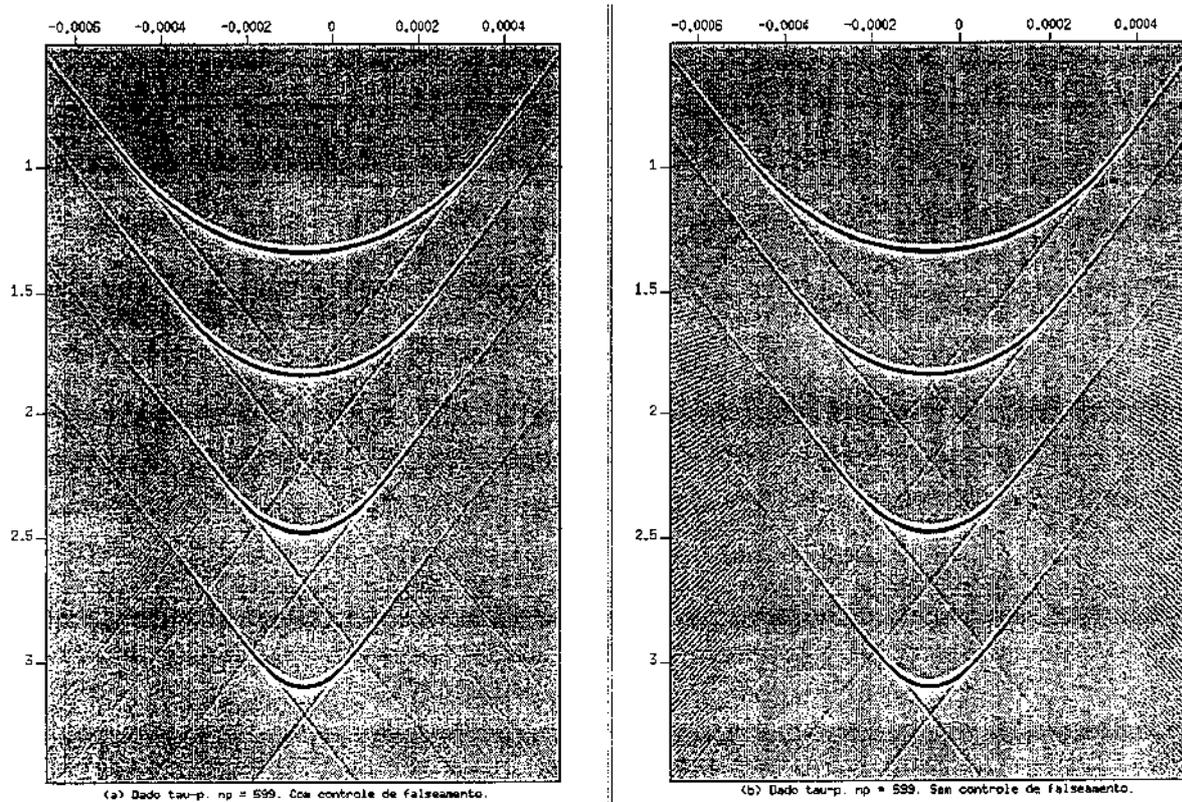


Figura 3.13: Sismogramas transformados no domínio $\tau - p$ (transformada direta). (a) Dado transformado com controle de falseamento; (b) Dado transformado sem controle de falseamento. Ambos transformados com $np = 599$.

falseamento causou o estiramento do pulso dos eventos mergulhantes, porém sem a atuação do controle, uma enorme quantidade de artefatos pode ser vista no dado reconstituído.

- A sugestão feita por Yilmaz não reconstituiu o dado adequadamente.
- A reconstituição é eficaz quando é utilizado o controle de falseamento do algoritmo, mesmo que o dado de entrada apresente falseamento espacial em alguns eventos (Fig. 3.15a). Deve-se, entretanto, ficar atento para uma adequada parametrização em p , de modo que o controle de falseamento do algoritmo possa atuar corretamente.

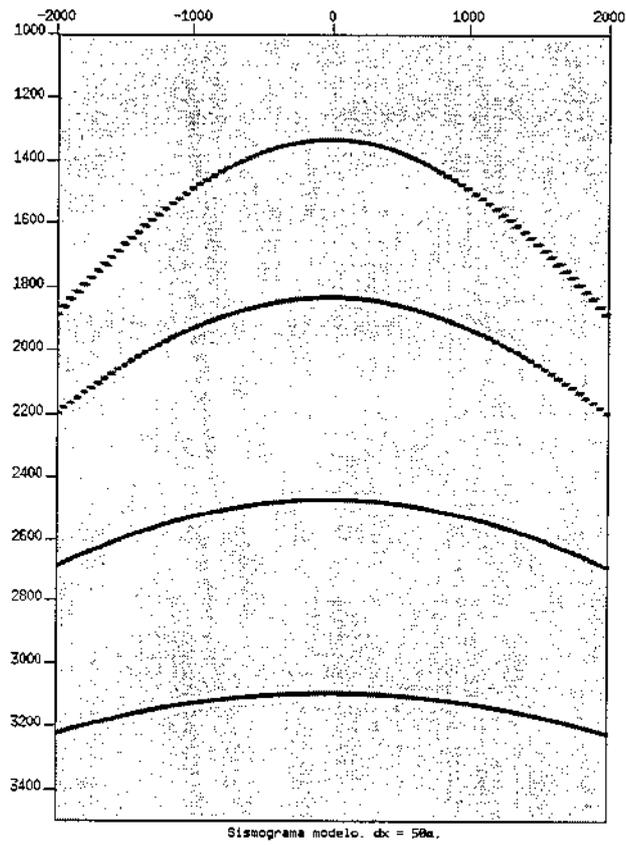


Figura 3.14: Sismograma proveniente do modelo de camadas planas horizontais, lanço:-2000m a 2000m, $\Delta x = 50m$ e $n_x = 81$.

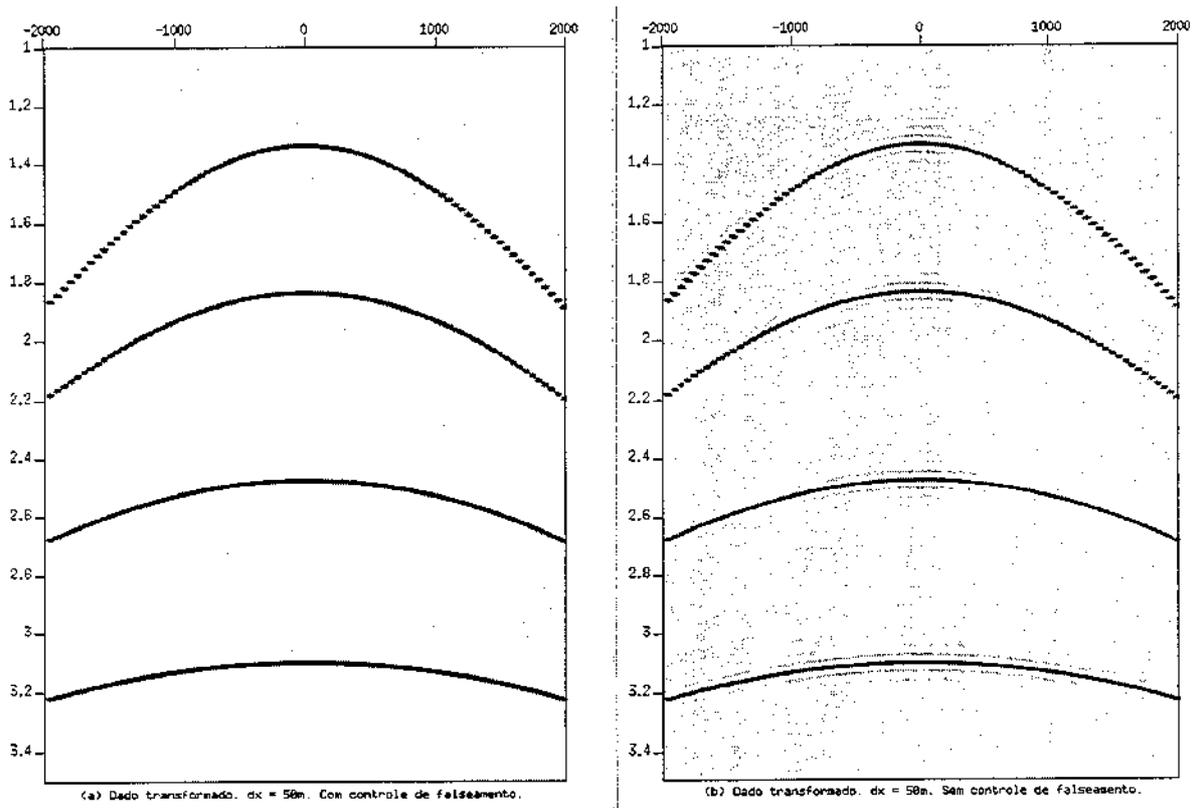


Figura 3.15: Sismogramas reconstituídos no domínio $t-x$, $\Delta x = 50m$. (a) Dado reconstituído com controle de falseamento; (b) Dado reconstituído sem controle de falseamento. Ambos reconstituídos com $np = 599$.

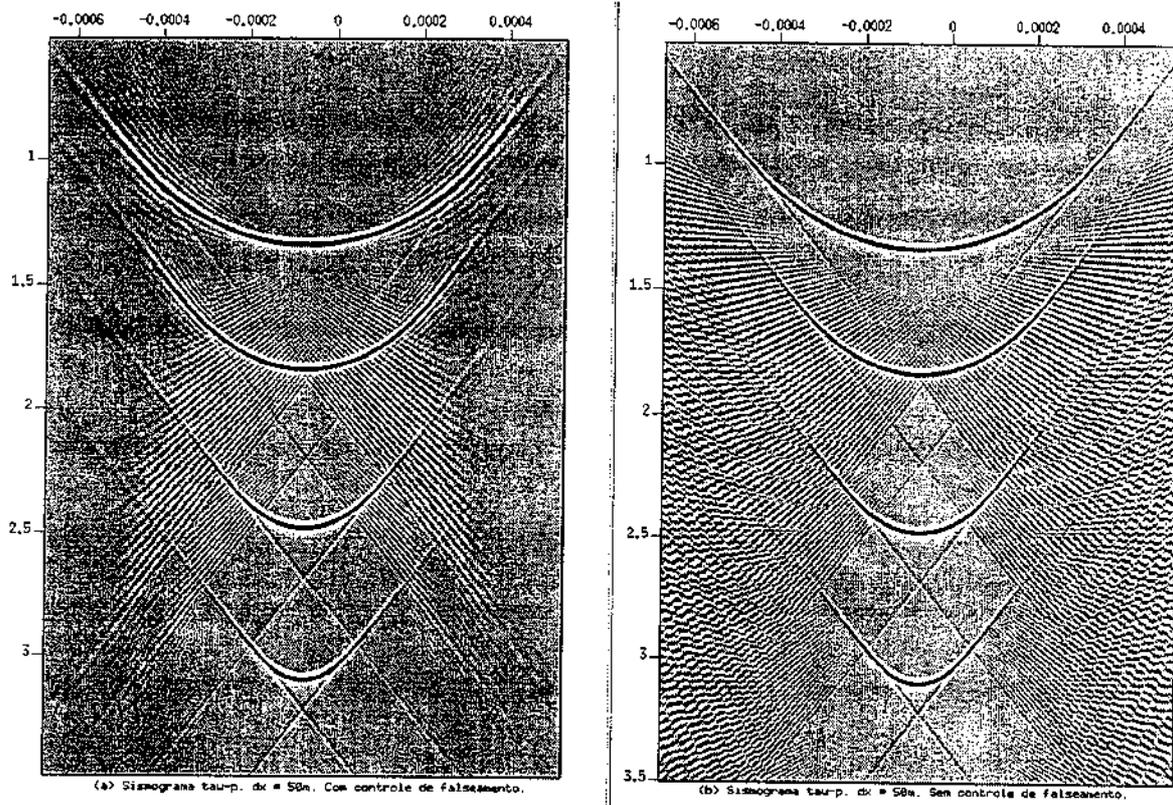


Figura 3.16: Sismogramas transformados no domínio $\tau - p$ (transformada direta), $\Delta x = 50\text{m}$. (a) Dado transformado com controle de falseamento; (b) Dado transformado sem controle de falseamento. Ambos transformados com $np = 599$.

3.2 Interpolação de dados

A interpolação de dados é uma tarefa que sempre está presente na atividade do processamento sísmico. Algumas vezes é utilizada para regularizar uma determinada aquisição, que possui o lançamento com dois intervalos de amostragem distintos: iniciando com um intervalo de amostragem do afastamento menor até um determinado afastamento e prosseguindo com um intervalo maior até o final. Ou simplesmente é utilizada para que o número de traços de saída seja o dobro ($2nx - 1$) ou o quádruplo ($4nx - 1$) do número de entrada.

Tal processo beneficia várias etapas do processamento, uma delas é a migração.

O dado é transformado para o domínio $\tau - p$ com parâmetros p dimensionados adequadamente. Na transformada inversa, pode-se escolher os parâmetros x que se deseja interpolar. Por exemplo, a partir de um dado de entrada com intervalo entre traços originalmente de 50m, faz-se a transformada $\tau - p$ inversa com o intervalo entre traços de 25m ou 12,5m. A seguir serão discutidos alguns exemplos de interpolação feitos pela transformada $\tau - p$.

3.2.1 Testes de interpolação

Os sismogramas utilizados nos testes possuem $\Delta x = 50m$, $\Delta x = 25m$ e $\Delta x = 12,5m$. As transformadas $\tau - p$ serão realizadas com $\Delta p = 0,00000223$, $np = 599$ e $p_{min} = -p_{max} = 0,000667$, todas com a opção de controle de falseamento.

O sismograma, cujo espaçamento original é de 50m, é interpolado no domínio $\tau - p$ para 25m e 12,5m (Teste 1).

No teste 2, é abordada a interpolação para 12,5m do dado com espaçamento original entre traços de 50m com a correção de NMO ("Normal move out") aplicada ao dado de entrada antes da transformada $\tau - p$.

O teste 3 mostra a transformada $\tau - p$ do sismograma de um dado de geologia bastante complexa, que é o sismograma sintético gerado do modelo de Marmousi ($\Delta x = 25m$). A partir desse dado, os traços pares foram selecionados e a transformada deste novo dado ($\Delta x = 50m$) foi feita impondo, na transformada de volta, $\Delta x = 25m$.

Teste 1 - Interpolação de dados, sismograma de entrada $\Delta x = 50\text{m}$

O sismograma $\Delta x = 50\text{m}$ é transformado para o domínio $\tau - p$ com os parâmetros descritos acima e, no cálculo da transformada inversa, é interpolado para $\Delta x = 25\text{m}$ (duplicando o número de traços) e $\Delta x = 12,5\text{m}$ (quadruplicando o número de traços). A Figura 3.17 mostra o sismograma modelo de entrada, $\Delta x = 50\text{m}$, e o dado reconstituído com o mesmo espaçamento entre traços.

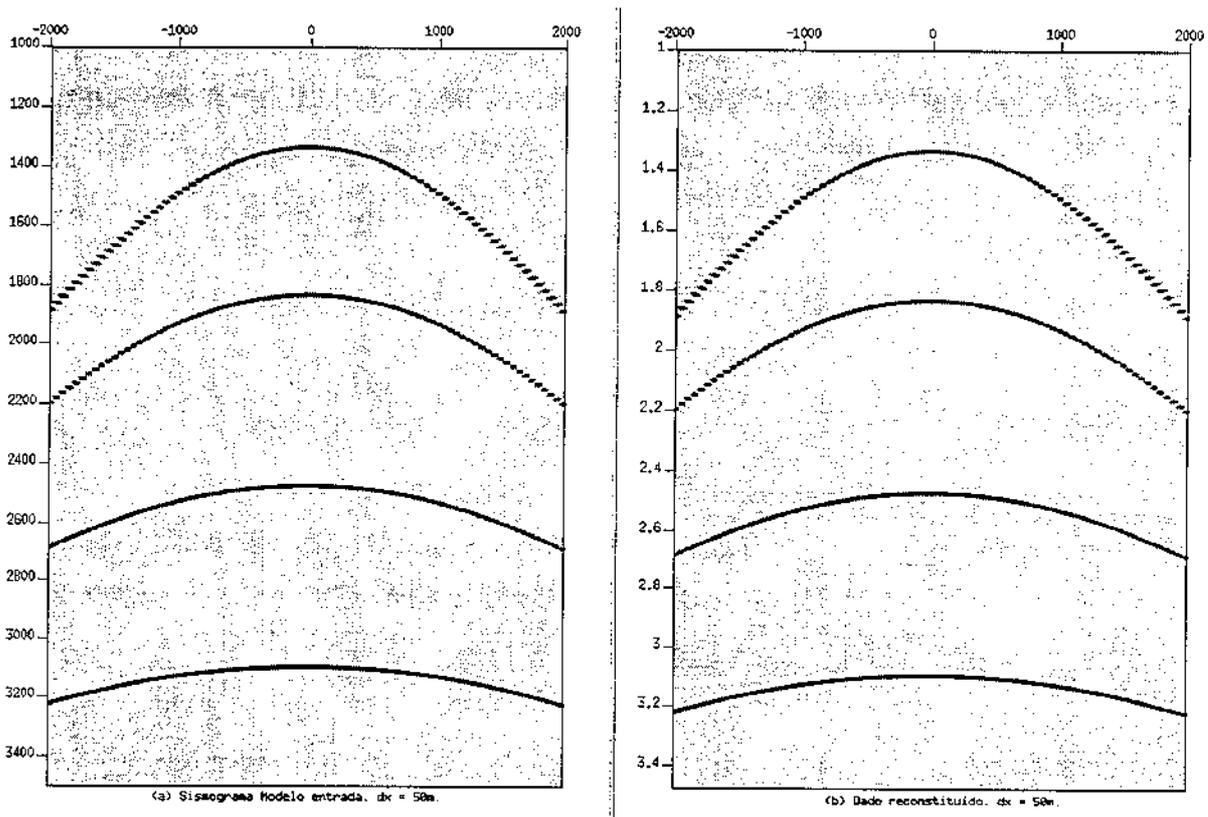


Figura 3.17: (a) Sismograma proveniente do modelo de camadas planas horizontais, lanço: -2000m a 2000m, $\Delta x = 50\text{m}$ e $n_x = 81$, escala de tempo em ms; (b) Dado reconstituído, $\Delta x = 50\text{m}$, escala de tempo em s.

O resultado da interpolação é visto na Figura 3.18. O dado original (Fig. 3.17a) possui os dois primeiros eventos de reflexão com falseamento espacial. O dado cuja a transformada inversa utilizou o mesmo número de traços (Fig. 3.17b, $n_x = 81$) mostra que a reconstituição foi bem sucedida.

Os dados interpolados com $\Delta x = 25\text{m}$ e $\Delta x = 12,5\text{m}$ (Figs. 3.18a e 3.18b, respectivamente), embora apresentem mais artefatos deixados pelo operador, mostram os eventos bem reconstituídos, com o falseamento dos dois refletores mais rasos começando em tempos maiores (o início do falseamento está indicado pelas setas). O modelo de entrada (Fig. 3.17a) apresenta falseamento espacial dos eventos mais rasos a partir do afastamento de 700m. Já no dado interpolado (tanto de 25m, quanto de 12,5m), o falseamento começa a ocorrer a partir do afastamento de 1000m. A essa observação soma-se o fato de os artefatos estarem ocorrendo nos maiores mergulhos. Tais artefatos ocorrem devido à interpolação incorreta (Fig. 3.18 nos dois eventos de reflexão mais rasos e nos afastamentos maiores (onde há os maiores mergulhos). Tal observação conduz a novos testes com a aplicação da correção de NMO antes da transformada direta e sua retirada após a transformada inversa.

Teste 2 - Interpolação de dados, sismograma de entrada com 81 traços com correção NMO aplicada antes da transformada $\tau - p$

Uma solução interessante do problema da interpolação com auxílio da transformada $\tau - p$ é aplicar a correção de NMO ao dado de entrada antes da interpolação, retirando-a após a transformada $\tau - p$ inversa. Com isso, os eventos de reflexão se horizontalizam, ou ficam próximos à horizontal, permitindo uma adequada interporlação dos traços.

As Figuras 3.19a e 3.19b mostram o dado original $\Delta x = 50\text{m}$ (Fig. 3.14) reconstituídos a partir transformada $\tau - p$ e interpolados para $\Delta x = 25\text{m}$ e $\Delta x = 12,5\text{m}$, respectivamente. Ambos com prévia aplicação de NMO com a velocidade exata do modelo. Após a transformada, a correção de NMO foi retirada. Note-se que mesmo o falseamento espacial, presente nos eventos mais rasos do dado de entrada, deixa de ocorrer após a interpolação. O sismograma da Figura 3.19a é bastante similar ao modelo com espaçamento espacial original $\Delta x = 25\text{m}$ (Fig.3.3).

Teste 3 - Interpolação de dados, sismograma de Marmousi

O sismograma de entrada é um dado sintético de Marmousi, com as seguintes características:
lanço: -2575m a 2575m

$\Delta x = 25\text{ m}$

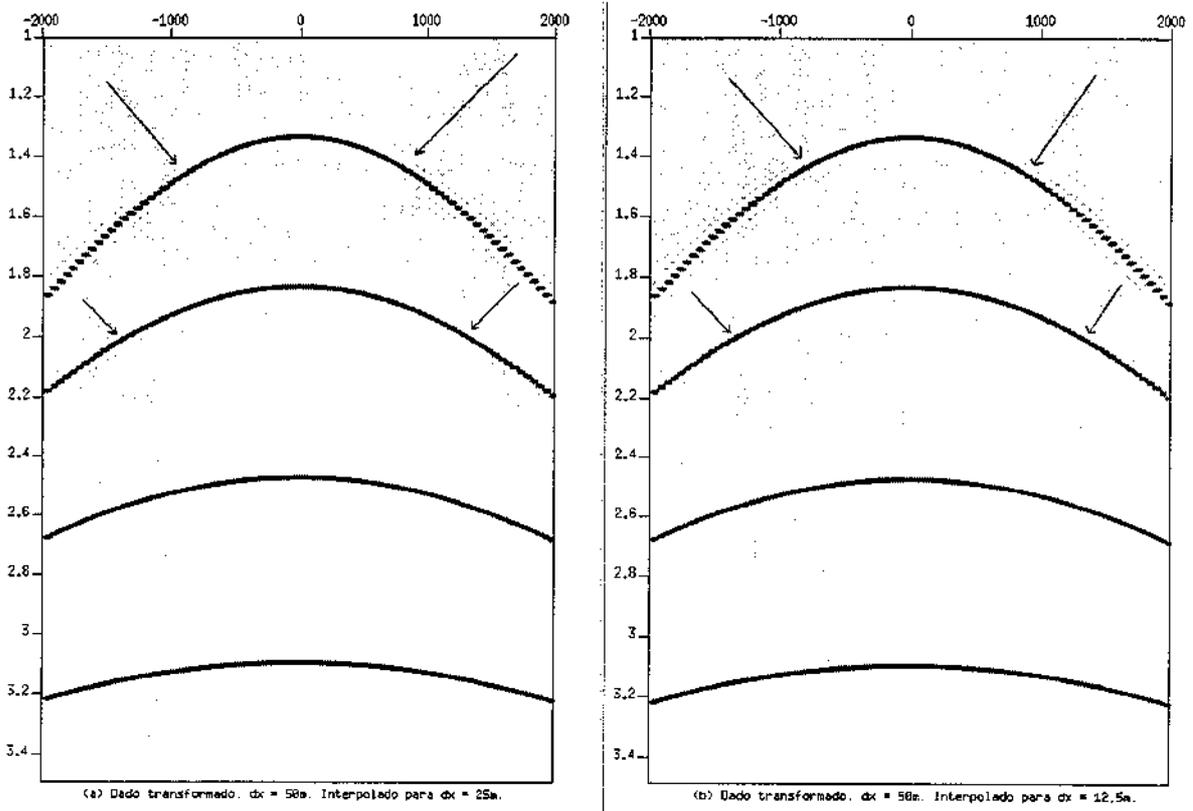


Figura 3.18: (a) Dado reconstituído $\Delta x = 50m$, interpolado para $\Delta x = 25m$, $n_x = 161$; (b) Dado reconstituído $\Delta x = 50m$, interpolado para $\Delta x = 12,5m$, $n_x = 321$. As setas indicam o início do falseamento nos dois eventos mais rasos.

$n_x = 207$

A partir do sismograma sintético de Marmousi, foram seleccionados os traços pares ($\Delta x = 50m$) e realizadas as transformadas $\tau - p$ direta e inversa. A transformada direta foi feita com os seguintes parâmetros em p : $p_{min} = -p_{max} = 0,000667$, $dp = 0,00000173$. Na transformada inversa, impôs-se o dobro do número de traços de entrada, restaurando o dado original de Marmousi ($\Delta x = 25m$). A Figura 3.20 mostra o sismograma original de Marmousi ($\Delta x = 25m$), a seleção dos traços pares ($\Delta x = 50m$) e o dado reconstituído com $\Delta x = 25m$. Nota-se que o dado reconstituído e interpolado possui artefatos devido ao controle de falseamento da transformada ser

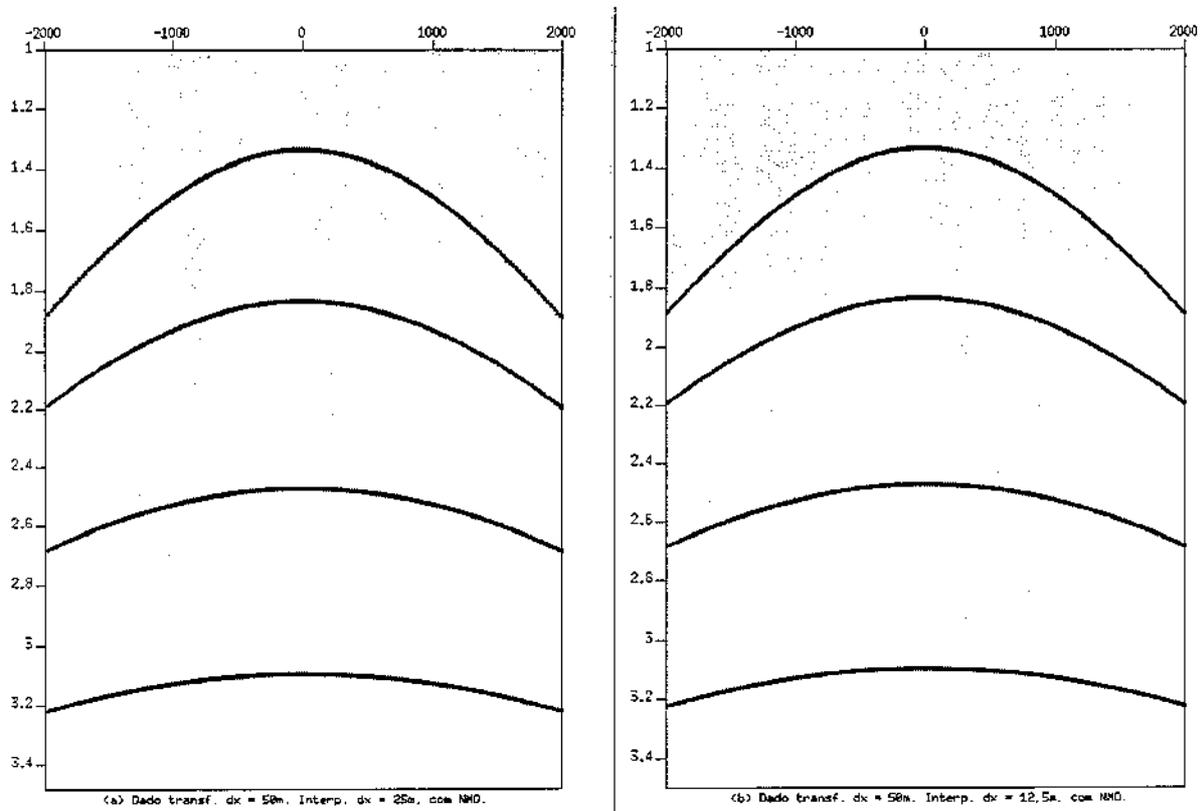


Figura 3.19: (a) Dado reconstituído $\Delta x = 50m$, interpolado para $\Delta x = 25m$, $n_x = 161$; (b) Dado reconstituído $\Delta x = 50m$, interpolado para $\Delta x = 12,5m$, $n_x = 321$. Ambos com NMO aplicado antes da transformada $\tau - p$.

menos rigoroso, pois $\Delta x = 25m$, quando o dado de entrada possui $\Delta x = 50m$.

A Figura 3.21 mostra os traços ímpares que não foram usados no teste anterior, os correspondentes traços interpolados com o auxílio da transformada $\tau - p$ e o sismograma diferença entre eles. Os artefatos devido ao controle de falseamento estão em evidência.

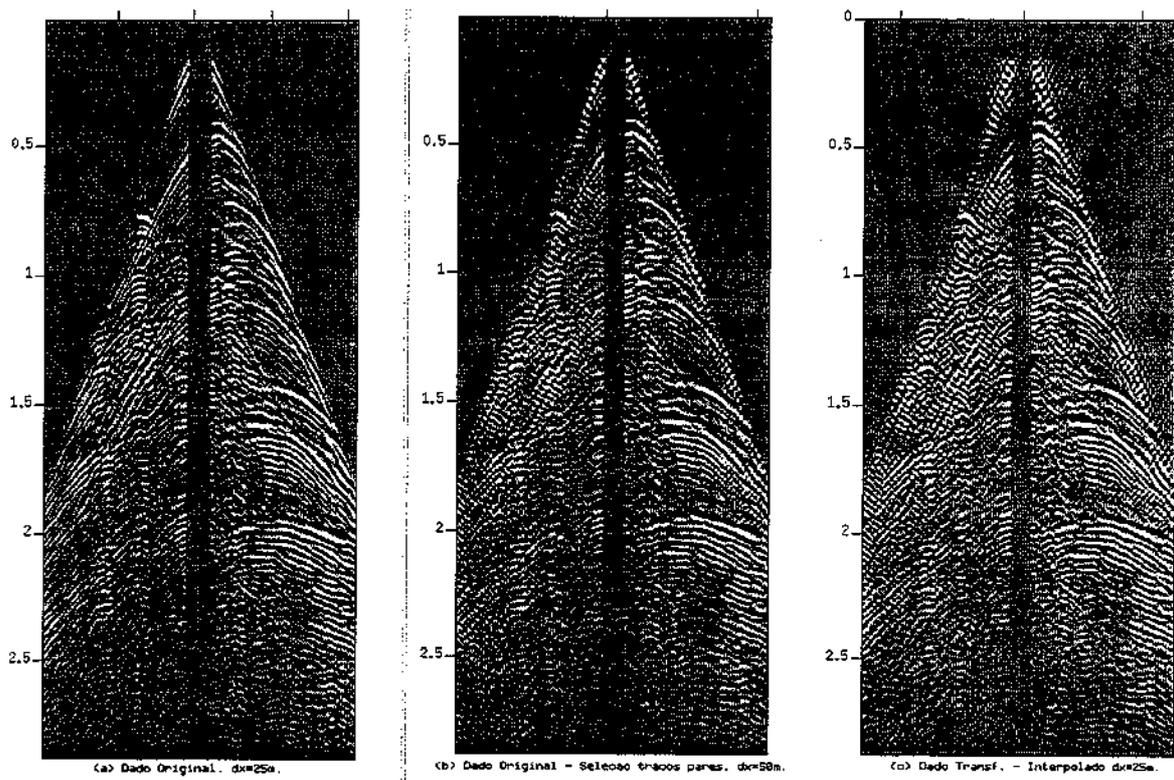


Figura 3.20: (a) Sismograma sintético proveniente do modelo Marmousi, lanço:-2575m a 2575m, $\Delta x = 25\text{m}$ e $n_x = 207$; (b) Seleção dos traços pares que será a entrada para a transformada $\tau - p$, $n_x = 103$ e $\Delta x = 50\text{m}$; (c) Dado reconstituído, interpolado com $\Delta x = 25\text{m}$ e $n_x = 207$.

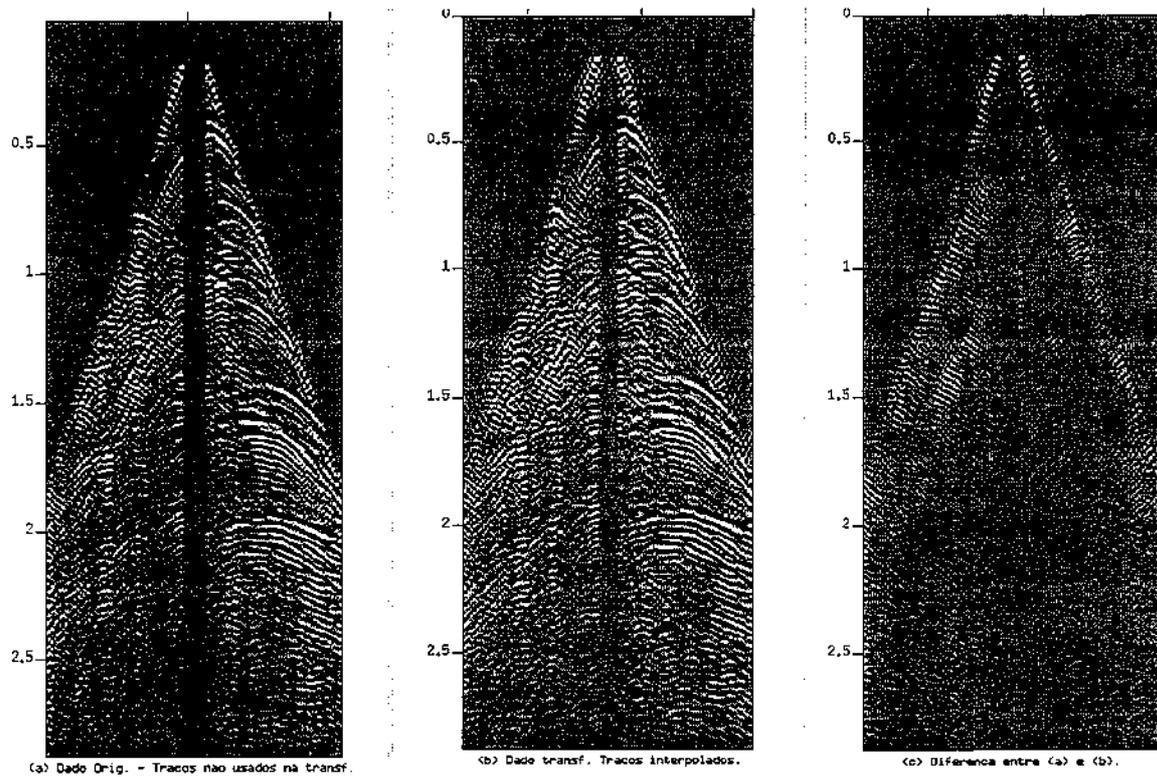


Figura 3.21: (a) Seleção dos traços ímpares do sismograma de Marmousi, tais traços não foram usados na transformada do teste anterior; (b) Dado reconstituído, traços interpolados correspondentes à (a); (c) Sismograma diferença ente (a) e (b).

3.3 Regularização de dados

Um dos objetivos deste trabalho é regularizar os dados de campo com o auxílio da transformada $\tau - p$. As informações que são amostradas com irregularidades no domínio do afastamento (tiros ou canais perdidos ou deslocados) devem ser regularizadas antes da realização de determinadas etapas do processamento sísmico.

Nem sempre as irregularidades no domínio do afastamento são devidas a perdas de tiros ou receptores. Em levantamentos marítimos, a deriva do cabo de hidrofones pode causar longos trechos sem informação sísmica ou com baixa cobertura e outros trechos com excesso de dados. Essa situação deve ser evitada pois, etapas como análise de velocidade e migração produzem melhores resultados quando o dado está amostrado uniformemente ao longo das linhas sísmicas.

Foram realizados testes para simular obstáculos operacionais, que tanto ocorrem em levantamentos terrestres (cidades, casas, estradas) como, mais raramente, em levantamentos marítimos (plataformas, recifes). Tal situação foi simulada por meio de sismogramas sintéticos gerados com espaçamento entre traços de 25m e com uma faixa de dados não registrados correspondentes a trinta traços ausentes consecutivos (trecho de 725m sem informação). Discutiu-se, nesta etapa, a relação entre o controle de falseamento utilizado pelo algoritmo, o ponderador e o afastamento médio entre os traços.

Na situação de levantamento marítimo com deriva do cabo de hidrofones, foi gerado um modelo com afastamento entre traços bem pequeno, de 5m. Posteriormente, a partir deste dado, foram retirados traços de forma aleatória de modo que restasse apenas um quinto dos dados, simulando uma aquisição irregular, cujo afastamento entre traços original devesse ser de 25m, não sendo, devido a correntes marítimas. O sismograma é transformado para o domínio $\tau - p$ e, posteriormente, a transformada inversa é realizada, impondo um novo espaçamento entre traços regular de 25m.

O modelo usado para gerar os sismogramas sintéticos regulares, que são os pontos de partida para a geração dos sismogramas das duas situações, é o modelo de camadas planas horizontais, com as velocidades descritas anteriormente.

3.3.1 Testes de regularização de dados

Para que se possa entender todos os fatores envolvidos na regularização de dados sísmicos pelas transformadas direta e inversa $\tau - p$, é necessário entender três cálculos realizados pelo algoritmo que estão ligados entre si:

- Cálculo da distância média entre traços, $\overline{\Delta x}$.

A distância média entre traços é a média de todas as distâncias entre traços, que será usada no cálculo da frequência de Nyquist, tendo influência direta no controle de falseamento e no ponderador.

$$\overline{\Delta x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Delta x_i,$$

onde N é o número de amostras.

- Ponderador.

O ponderador varia para cada traço. Calcula-se o peso do traço i , comparando seu afastamento (distância fonte-receptor, h_i) com os afastamentos dos traços vizinhos (h_{i+1} e h_{i-1}), segundo a fórmula:

$$\rho_i = \frac{\Delta x_{i+1} + \Delta x_i}{2\overline{\Delta x}} = \frac{h_{i+1} - h_{i-1}}{2\overline{\Delta x}}, \quad (3.4)$$

onde ρ_i é o ponderador do traço i , Δx_i é a distância entre os traços i e $i-1$, h_i é o afastamento do traço i (distância fonte-receptor) e $\overline{\Delta x}$ é a distância média entre os traços.

Se o dado for regular, o peso de cada traço é 1. Com a presença de irregularidades, o ponderador variará para cada traço, levando em consideração a distância entre os dois traços vizinhos.

- Controle de falseamento.

O controle de falseamento para a transformada direta será mais uma vez lembrado, calcula-se a frequência de Nyquist para cada inclinação p :

$$f_{\text{NYQ}} = \frac{1}{2 \cdot p \cdot \overline{\Delta x}}$$

Nos testes anteriores, os sismogramas eram regulares, fazendo com que a distância média entre traços fosse igual ao intervalo de amostragem espacial Δx . Quanto ao ponderador, na ausência de irregularidades, assume o valor da unidade para todos os traços.

Para dados irregulares, esses fatores interagem, de modo que os resultados devem ser analisados levando em consideração tal interação.

Teste 1 - Regularização de dados - Simulação de obstáculo operacional

O sismograma $\Delta x = 25\text{m}$ será a entrada para gerar o dado com ausência de 30 traços consecutivos, $n_x = 131$ (Fig. 3.22).

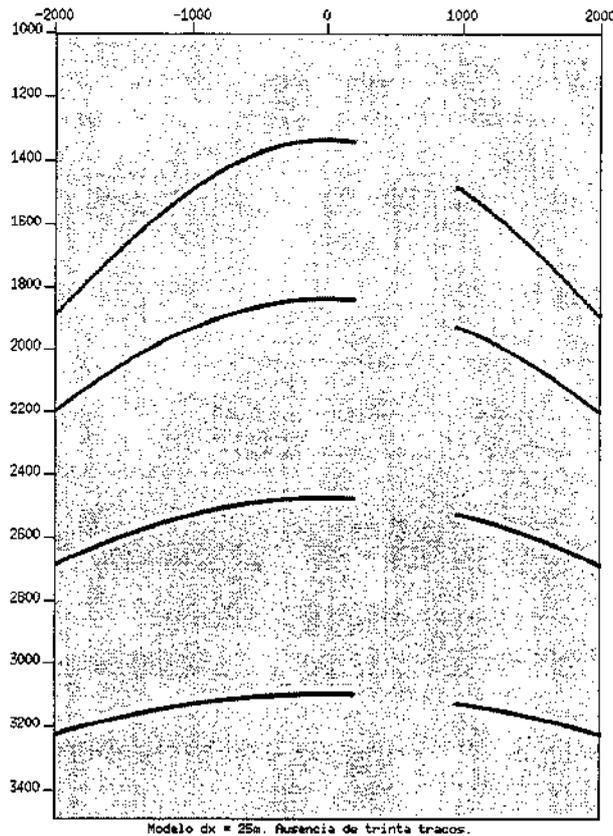


Figura 3.22: Modelo $\Delta x = 25\text{m}$, com ausência de trinta traços, $n_x = 131$.

Os parâmetros p usados na transformada foram $p_{max} = -p_{min} = 0,000667$, $\Delta p = 0,00000223$

e $np = 599$. Todos os sismogramas reconstituídos possuem 161 traços. Os sismogramas que foram reconstituídos com e sem ponderador são vistos nas Figuras 3.23a e 3.23b, respectivamente. O peso dos dois traços das extremidades do salto de informação é 15,5, enquanto no restante dos traços o peso é 1. Devido a isso, esses traços geram efeitos de borda de modo muito acentuado. Porém, nota-se, na Figura 3.23a, uma tentativa de interpolação do trecho sem informação por meio de retas horizontais. O fato de interpolar por retas horizontais corrobora com a idéia de aplicação da correção de NMO antes da transformada $\tau - p$.

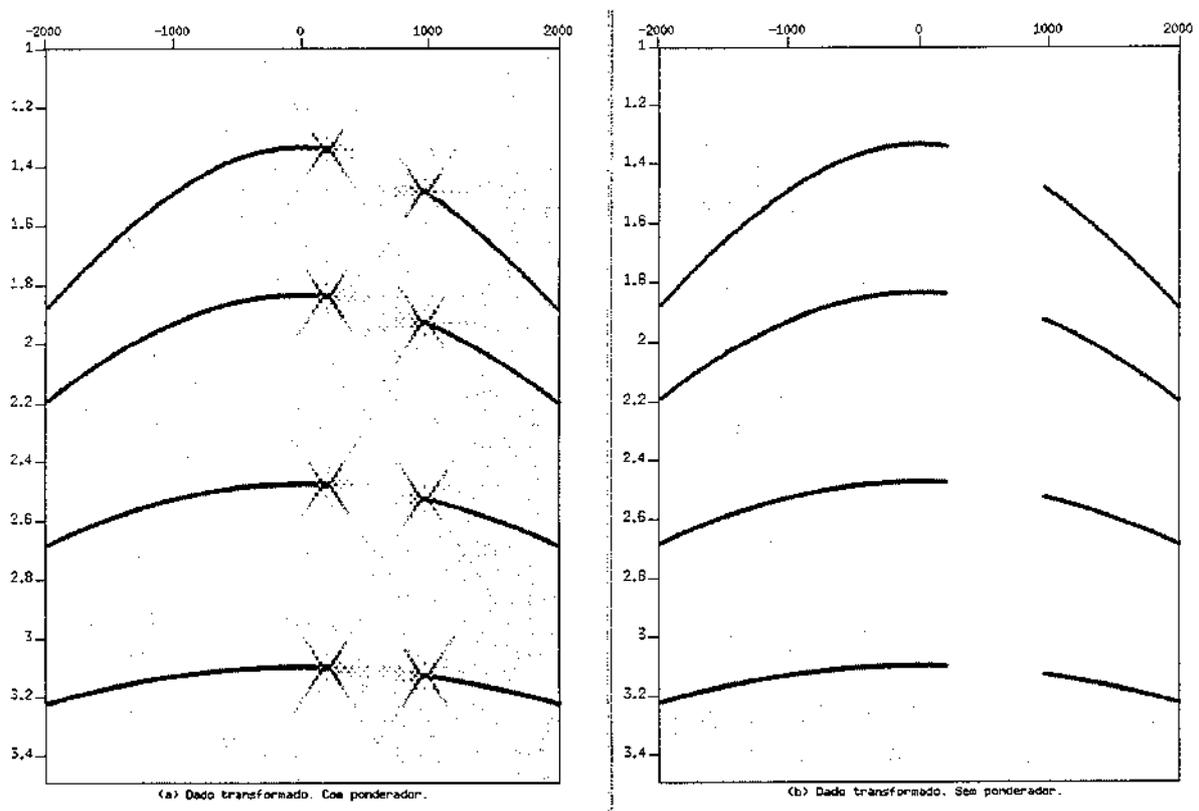


Figura 3.23: (a) Dado reconstituído, $nx = 131$, com ponderador; (b) Dado reconstituído, $nx = 131$, sem ponderador

Aplicando a correção de NMO antes da transformada $\tau - p$ e retirando-a depois, permite o uso de um controle de falseamento mais rigoroso, evitando, dessa maneira, o estiramento do pulso dos eventos mergulhantes. Antes de começar os testes com o NMO aplicado ao dado, será estudado

como o controle de falseamento e o ponderador podem ajudar para que o dado seja interpolado corretamente nos locais de ausência de informação e como podem minimizar os efeitos de borda.

O controle de falseamento fica mais rigoroso quando tem-se a ausência de trechos sem informação (no caso em estudo, trinta traços consecutivos) porque aumenta a distância média entre traços, conseqüentemente mudam a f_{NYQ} e o ponderador calculados pelo algoritmo. A ausência de trinta traços eleva distância média entre traços a

$$\overline{\Delta x} = 30,813953.$$

No caso do dado regular, $\overline{\Delta x}$ é igual a 25m. Logo, para cada valor de p , a f_{NYQ} (frequência máxima até onde o empilhamento oblíquo é calculado) diminui com a ausência de traços:

$$f_{NYQ} = \frac{1}{2p\overline{\Delta x}}.$$

O efeito que se nota nos dados reconstituídos com o controle de falseamento é a ausência de altas frequências dos eventos mergulhantes, evidenciado aqui, pelos altos valores de p na fórmula acima, restringindo ainda mais a frequência de Nyquist. Essa ausência de frequências altas, causa um estiramento do pulso no domínio do tempo.

A distância média entre traços também está relacionada com o ponderador, como pode ser visto na equação 3.4.

Os testes a seguir mostram o comportamento da transformada $\tau - p$ quando multiplica-se a distância média por dois e por quatro. Esses novos valores serão chamados de distância de referência, Δx_r . Por exemplo: $\Delta x_{r2} = 2\overline{\Delta x}$ e $\Delta x_{r4} = 4\overline{\Delta x}$. Esses testes servirão para o entendimento dos efeitos de um controle de falseamento mais rigoroso, já que a influência no ponderador será apenas de um fator de escala.

A Figura 3.24 mostra o dado reconstituído com distâncias de referência iguais a duas e quatro vezes a distância média entre traços, ambos com o ponderador. Pode ser visto que, apesar da pior reconstituição dos eventos mergulhantes, um controle de falseamento mais rigoroso atua no trecho sem informação numa tentativa de preenchê-lo (Fig. 3.24b). Tal fato mostra que o caminho para uma tentativa de regularizar os dados corretamente passa por encontrar um parâmetro, calculado a partir de informações do dado de entrada, que atue no controle de falseamento quando o intervalo entre traços é irregular.

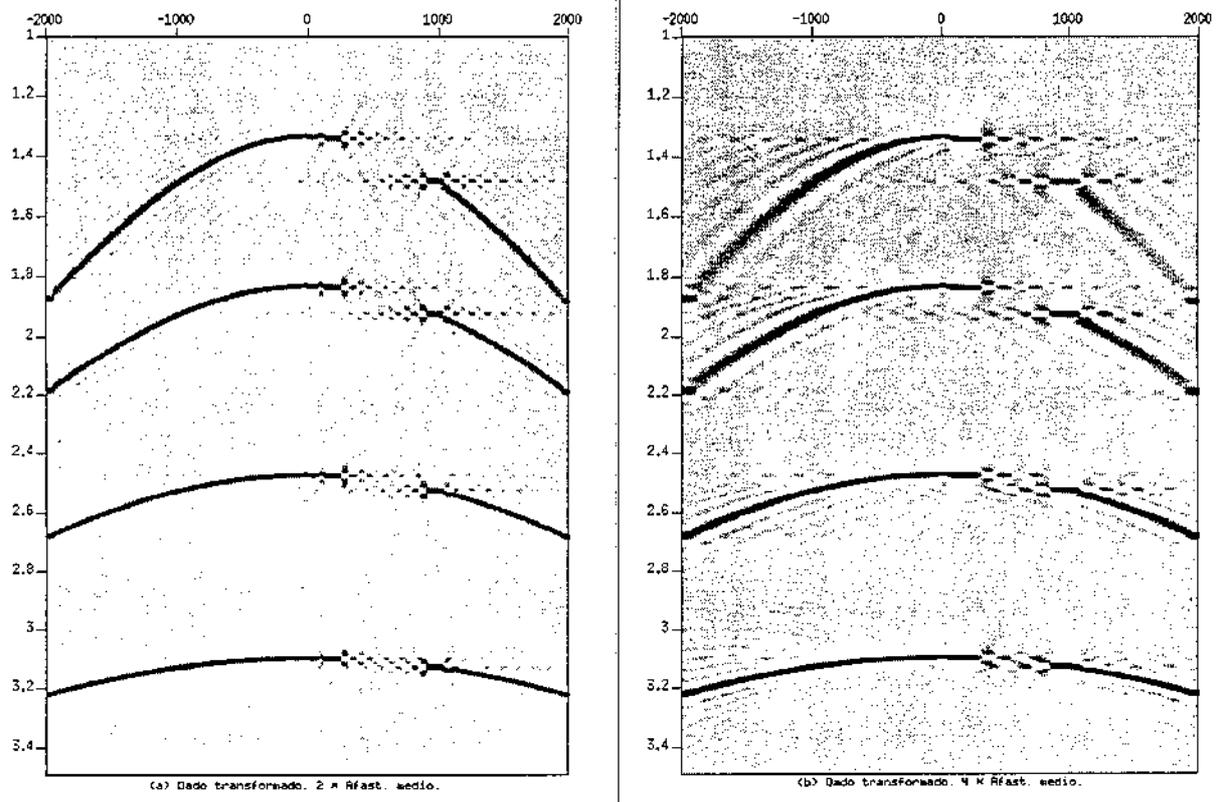


Figura 3.24: (a) Dado reconstituído com distância de referência igual a 2 vezes a distância média; (b) Dado reconstituído com distância de referência igual a 4 vezes a distância média entre traços.

O controle de falseamento é único para cada valor de p , independente do traço, pois usa-se uma única distância média, igual para todos os traços: $f_{\text{NYQ}}[p]$. Dois testes foram realizados na tentativa de parametrizar melhor o controle de falseamento quando há irregularidades no intervalo entre traços.

Primeiro variou-se o controle de falseamento para cada traço, chamado neste trabalho de controle com ponderador local, fazendo com que o controle leve em consideração os afastamentos dos traços vizinhos, ρ_i :

$$f_{\text{NYQ}}[i, p] = \frac{1}{2\rho_i p \Delta x}$$

O segundo teste é continuar com um controle único para todos os traços (só variando com p), porém normalizado pelo máximo ponderador obtido (no caso em estudo $\rho_{\text{max}} = 15,5$). A este

novo tipo de controle chamou-se de ponderador máximo:

$$f_{NYQ}[p] = \frac{1}{2\rho_{max}p\Delta x}$$

A Figura 3.25 compara o dado reconstituído com os três controles de falseamento: só em função de p (Fig. 3.25a - controle antigo, repetição da figura 3.23a), com o ponderador local (Fig. 3.25b) e com o ponderador máximo (Fig. 3.25c). Nota-se que os dois últimos mostram uma diminuição dos efeitos de bordas (devido ao alto mergulho das retas nas bordas do salto de informação) e um fortalecimento da interpolação do trecho sem informação por retas horizontais. Os eventos de reflexão do dado reconstituído com o controle de falseamento com ponderador local (Fig. 3.25b) estão bem recuperados e não estão estirados como os do dado reconstituído com o controle de falseamento com o ponderador máximo (Fig. 3.25c). Este, mais rigoroso, reconstituiu precariamente todos os eventos mergulhantes, contudo, os resultados mostram que vale a pena repetir esses testes com a aplicação do NMO antes da transformada $\tau - p$.

A aplicação da correção de NMO antes da transformada $\tau - p$ faz com que o rigor na aplicação do controle de falseamento não afete os eventos de maior mergulho, pois todos os eventos estarão horizontalizados ou próximos da horizontal quando transformados. Depois da transformada inversa, é retirado o NMO com a mesma velocidade. As velocidades utilizadas nos testes serão as mesmas que foram usadas na geração do modelo, quer dizer, não haverá erros na velocidade. Mais adiante, serão feitos testes de aplicação de NMO com erros de velocidade.

Convém lembrar que a regularização dos dados é realizada, normalmente, no início do processamento sísmico, portanto, a correção de NMO é feita geralmente utilizando uma velocidade preliminar, expedita. Isso não invalida o processo porque o objetivo nesta etapa não é corrigir o dado com uma velocidade exata, e sim diminuir os mergulhos presentes para que esses não sejam afetados pelo controle de falseamento mais rigoroso. Após a realização da transformada inversa essa velocidade preliminar será retirada.

Novamente, a correção de NMO será feita porque foi visto que a interpolação nas bordas do salto de informação se dá por retas horizontais (Fig. 3.25). Se a correção for relativamente boa, os eventos ficarão praticamente horizontais, possibilitando a atuação de um controle de falseamento mais rigoroso, onde os artefatos serão filtrados.

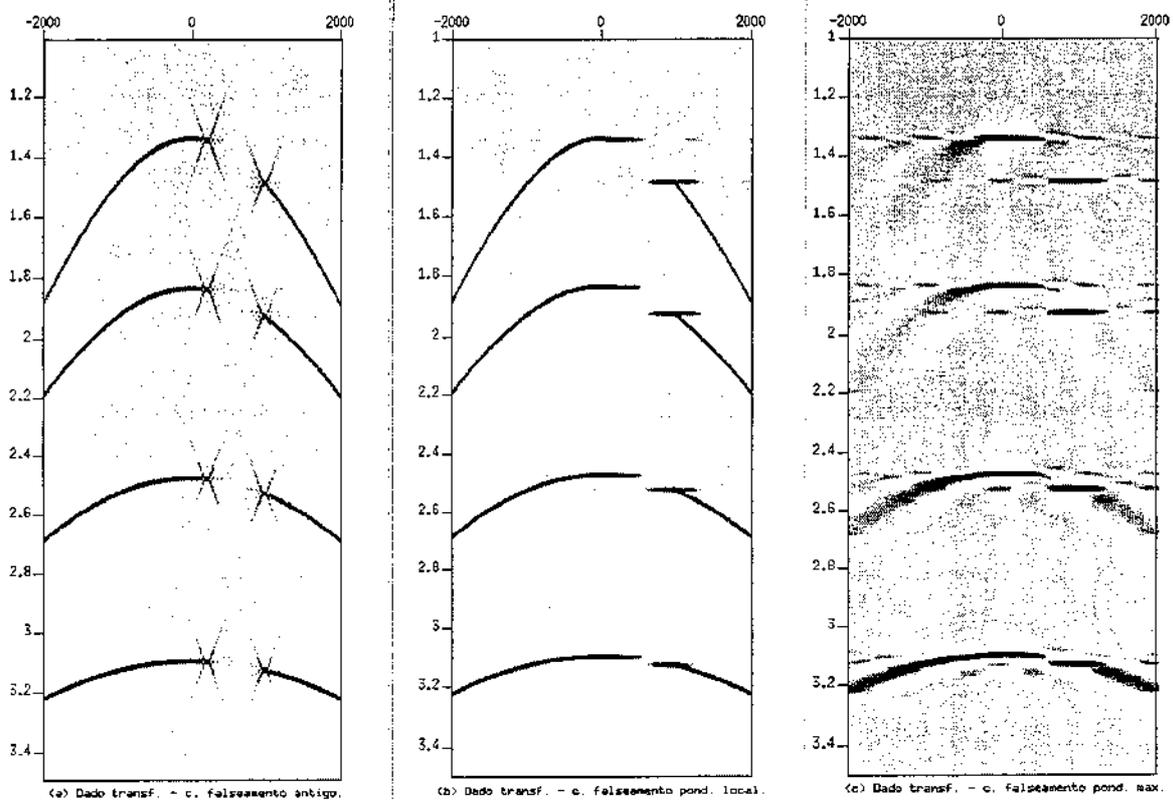


Figura 3.25: (a) Dado reconstituído, controle de falseamento variando apenas com p ; (b) Dado reconstituído, controle de falseamento com ponderador local; (c) Dado reconstituído, controle de falseamento com ponderador máximo.

A correção NMO é aplicada aos dados com o controle de falseamento que só varia com p , com o que leva em consideração o ponderador local e com o que usa o ponderador máximo. A Figura 3.26 mostra esses dados reconstituídos. Nota-se, na Fig. 3.26a, que os efeitos de borda prejudicam muito a reconstituição do dado. Na Figura 3.26b, com controle usando o ponderador local, o preenchimento do salto está mais contínuo que o dado da Figura 3.26c, onde foi usado um controle de falseamento mais rigoroso e constante para todos os traços (só variando com p , ponderador máximo). Esse fato de o controle de falseamento com o ponderador local oferecer o melhor resultado para o preenchimento de um trecho sem informação pode ser melhor observado na Figura 3.27, onde comparam-se os traços localizados no centro do salto de informação dos da-

dos reconstituídos com os controles de falseamento com o ponderador local e máximo (Figs. 3.27c e 3.27d, respectivamente) com o traço equivalente de um modelo onde não há ausência de traços (Fig. 3.27b). Lembrando que o traço em questão, no modelo de entrada para as transformadas com os dois tipos de controles citados, está zerado (Fig. 3.27a). O traço do modelo utilizando o controle com o ponderador local (Fig. 3.27c) possui amplitude mais próxima ao do traço do modelo completo (Fig. 3.27b) e é menos ruidoso que o do dado reconstituído com o controle usando o ponderador máximo (Fig. 3.27d).

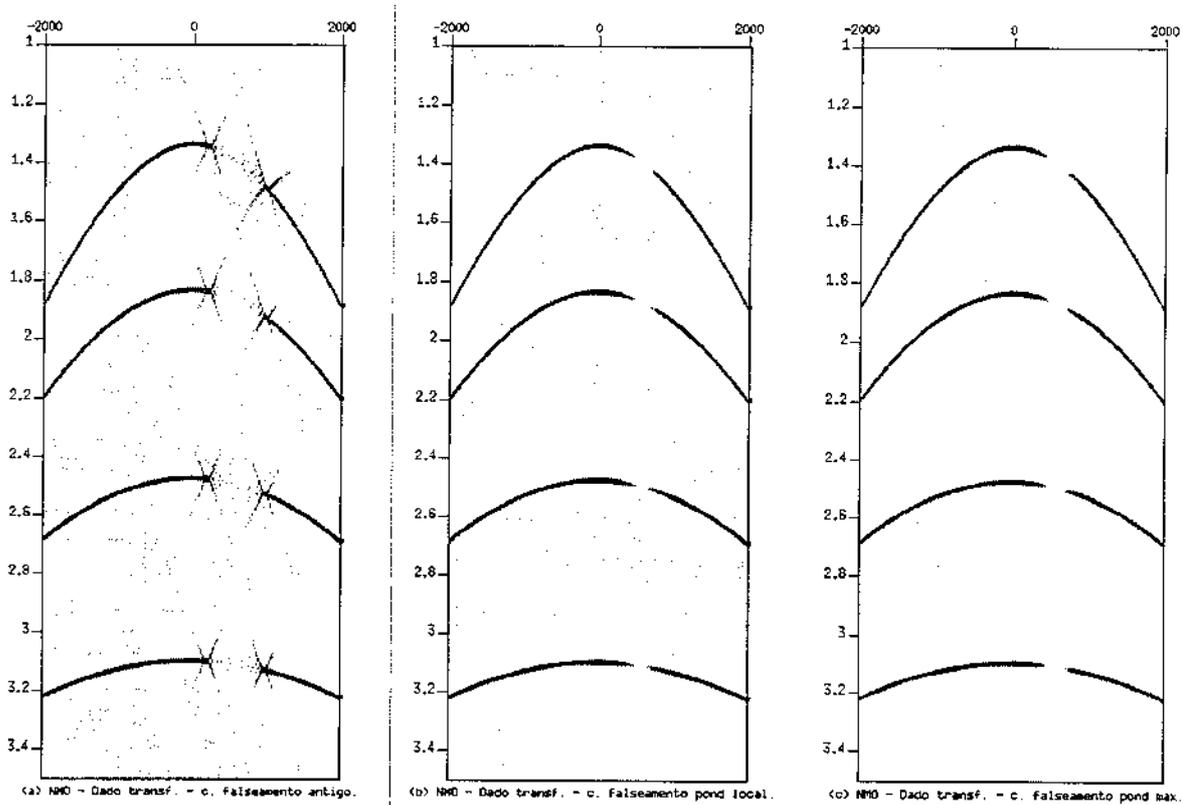


Figura 3.26: Aplicação de NMO antes da transformada $\tau - p$. (a) Dado reconstituído, controle de falseamento variando apenas com p ; (b) Dado reconstituído, controle de falseamento com ponderador local; (c) Dado reconstituído, controle de falseamento com ponderador máximo.

As Figuras 3.28 e 3.29 mostram o dado reconstituído com a aplicação prévia da correção de NMO com erros de 1, 3 e 5% nas velocidades em relação à velocidade do modelo, com o controle

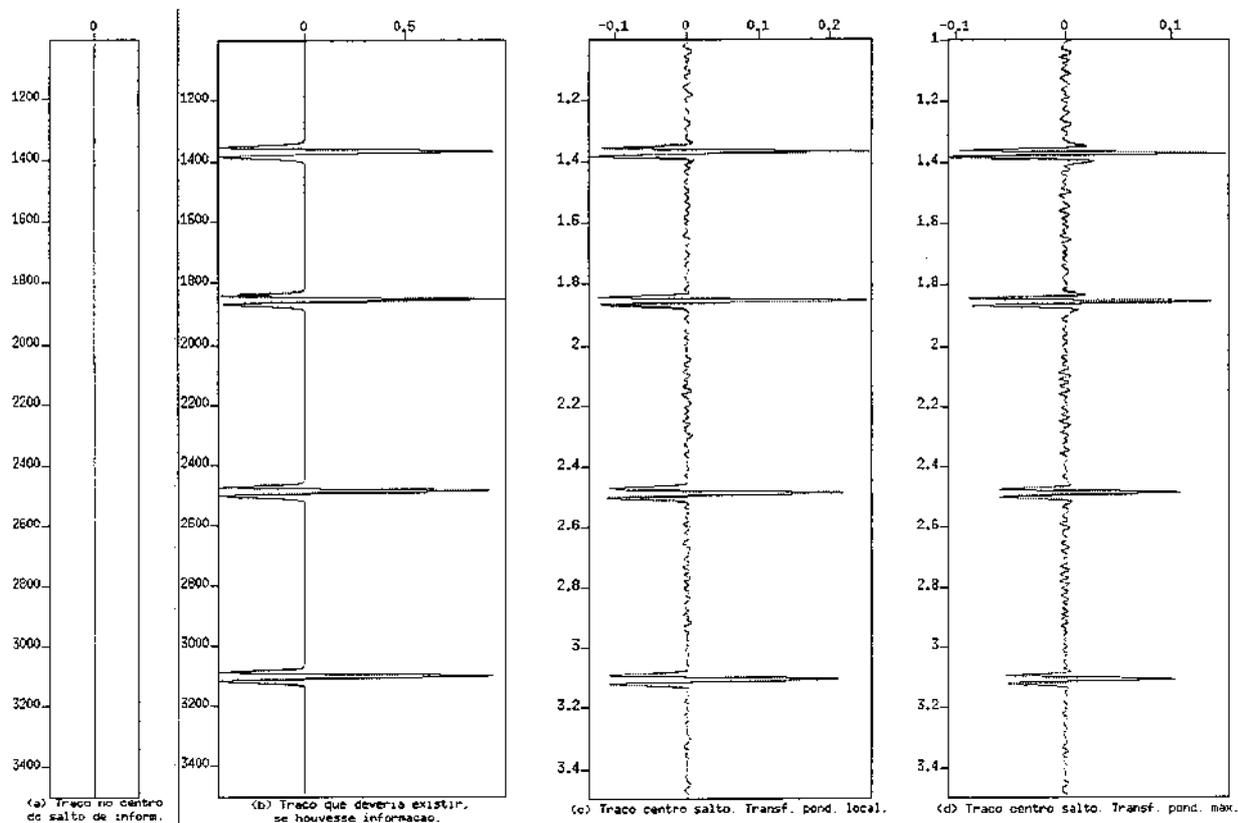


Figura 3.27: Comparação entre o traço no centro do trecho sem informação. (a) Traço central zerado do modelo com ausência de 30 traços; (b) Traço equivalente proveniente de um modelo com todos os traços; (c) Traço equivalente proveniente do dado reconstituído, controle de falseamento com ponderador local; (d) Traço equivalente proveniente do dado reconstituído, controle de falseamento com ponderador máximo. (c) e (d) reconstituídos com NMO aplicado

de falseamento usando ponderador local e máximo, respectivamente. Nota-se que para o refletor mais raso (o de maior "moveout", logo o mais sensível ao controle de falseamento) é tolerável erros da ordem de 5%. Lembrando que as velocidades das camadas superficiais são mais bem controladas tanto em levantamentos sísmicos terrestres quanto em marítimos. Nos dois refletores mais profundos, devido ao menor "moveout", são menores as diferenças entre o dado reconstituído com velocidades com erro da ordem de 5% e os dados reconstituídos com velocidade exata do modelo (Figs. 3.26b e 3.26c). Comparando os traços centrais do trecho sem informação que foram gerados pela transformadas $\tau - p$ com controle de falseamento usando ponderador local e

máximo e NMO aplicado (Figs. 3.30 e 3.31, respectivamente), nota-se que a transformada com ponderador local (Fig. 3.30) além de ser mais tolerante a erros de velocidade que a transformada com ponderador máximo (Fig. 3.31), reconstitui com mais fidelidade os eventos de reflexão.

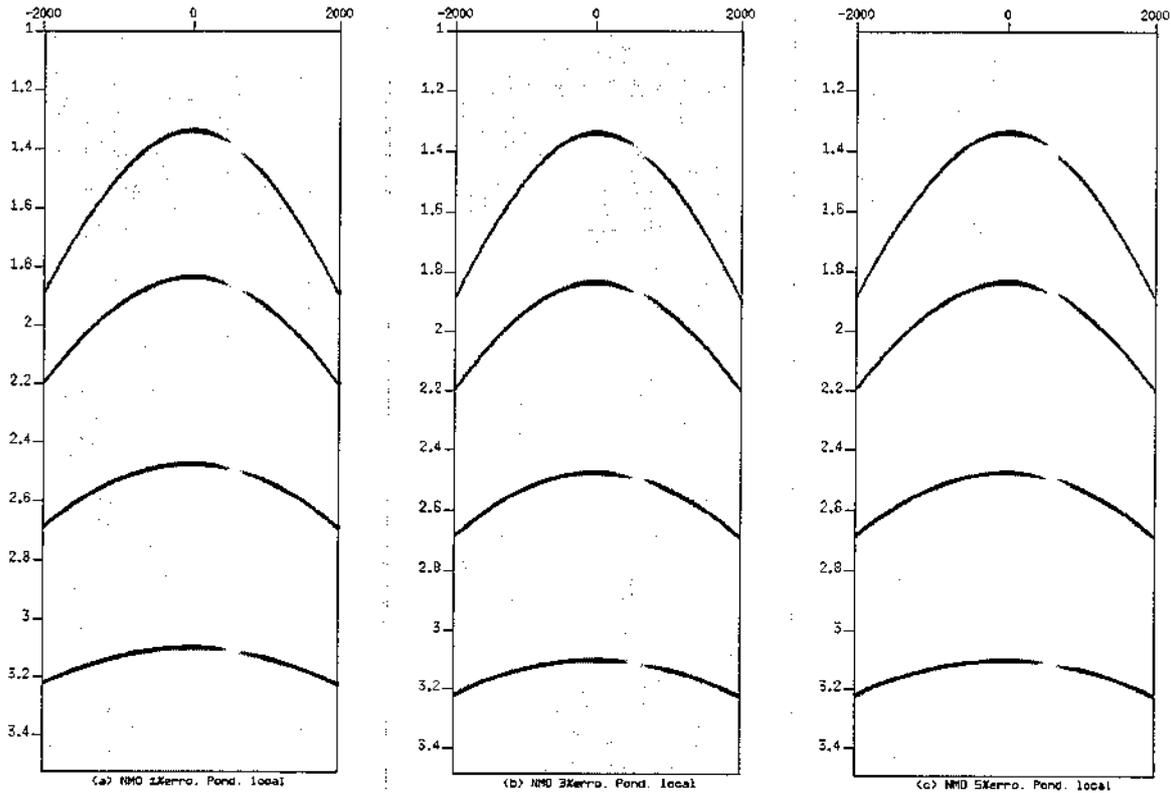


Figura 3.28: Aplicação de NMO com velocidades erradas antes da transformada $\tau - p$, controle de falseamento com ponderador local. (a) Dado reconstituído, erro de 1% nas velocidades; (b) Dado reconstituído, erro de 3% nas velocidades; (c) Dado reconstituído, erro de 5% nas velocidades.

Teste 2 - Regularização de dados - Simulação de deriva de cabo de hidrofones

O modelo geológico utilizado para obtenção do dado irregular é o mesmo modelo de camadas planas horizontais com velocidades constantes usado até agora. O sismograma que serve de entrada para a geração do sismograma irregular, possui lance de -1000m a 1000m, $\Delta x = 5m$ e $n_x = 401$. Um quinto dos traços foi retirado de forma aleatória, de modo que o sismograma de

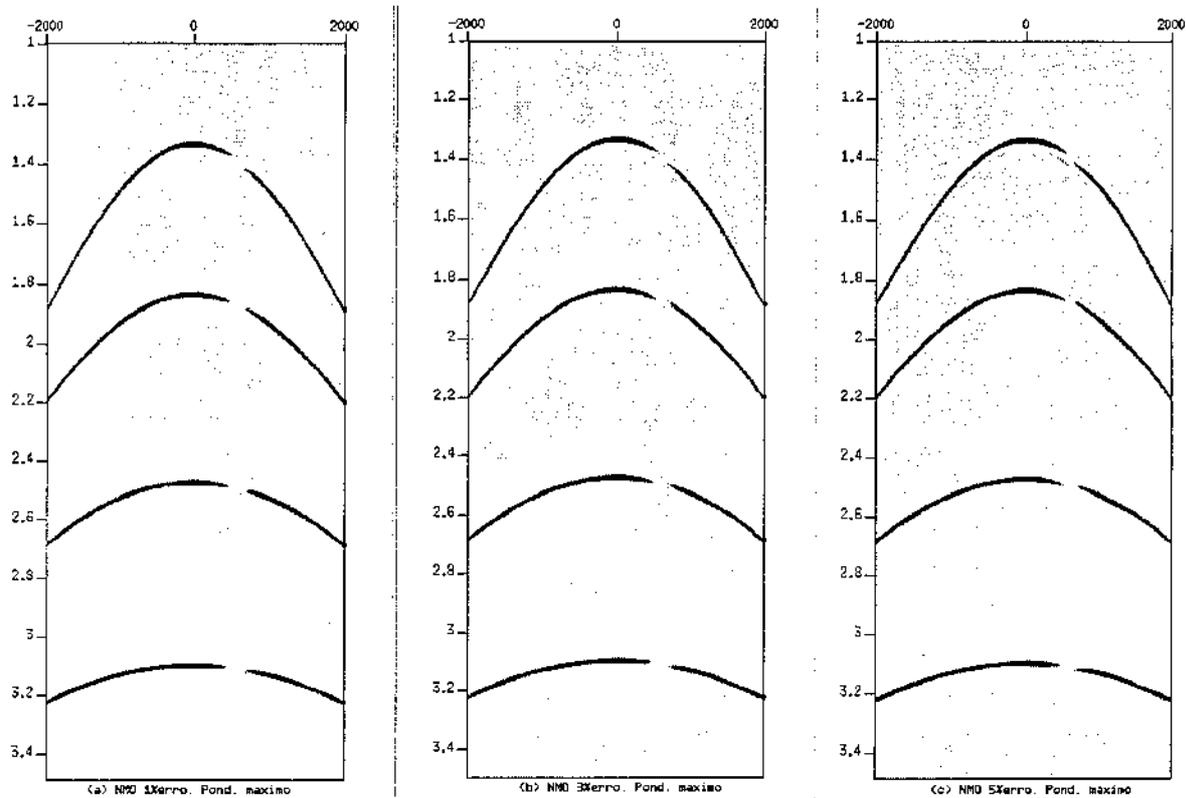


Figura 3.29: Aplicação de NMO com velocidades erradas antes da transformada $\tau - p$, controle de falseamento com ponderador máximo. (a) Dado reconstituído, erro de 1% nas velocidades; (b) Dado reconstituído, erro de 3% nas velocidades; (c) Dado reconstituído, erro de 5% nas velocidades.

entrada para os testes a seguir possui as seguintes características:

lanço: -1000 a 1000m

Δx : irregular, aproximadamente 25m.

nx : 81, escolhidos de maneira aleatória.

A Figura 3.32 mostra o sismograma de entrada para os testes com traços zerados para evidenciar a irregularidade da aquisição.

Este teste consiste em fazer a transformada $\tau - p$ do dado irregular, de modo que, na transformada inversa, o número de traços de saída seja igual ao número de traços de entrada, só que

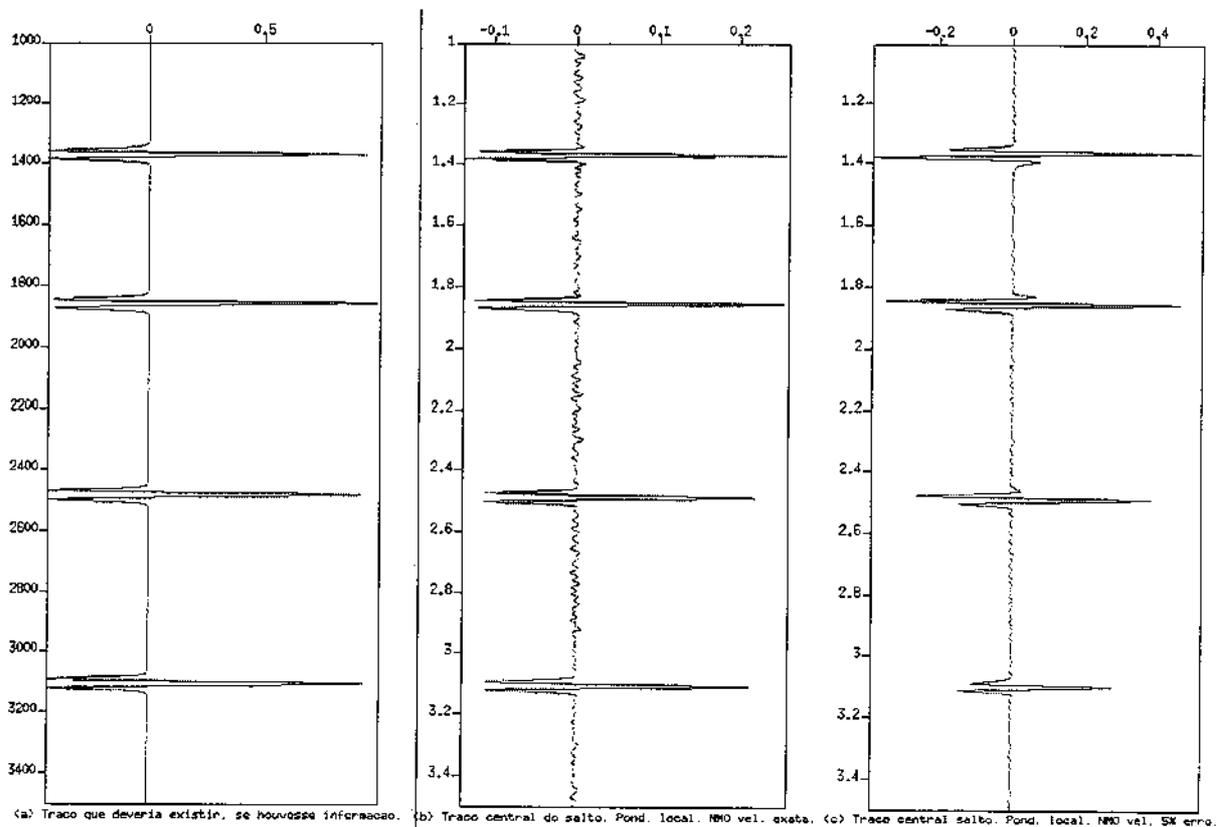


Figura 3.30: Comparação entre o traço central do trecho sem informação. (a) Traço equivalente proveniente do modelo com todos os traços; (b) Traço equivalente proveniente do dado reconstituído, controle de falseamento com ponderador local, NMO aplicado com velocidade exata; (c) Traço equivalente proveniente do dado reconstituído, controle de falseamento com ponderador local, NMO aplicado com erro de 5% na velocidade.

distribuídos de maneira regular. O modelo de entrada tenta simular uma aquisição marítima onde o intervalo entre traços que deveria ser de 25m é, devido à deriva do cabo, variável. Os parâmetros p são os mesmos dos testes anteriores. As mesmas investigações da relação entre o controle de falseamento, ponderador e distância média entre traços são repetidas para esta aquisição irregular.

Primeiramente, são comparados os dados reconstituídos com e sem o ponderador (Figs. 3.33a e 3.33b). Na transformada inversa é utilizado o intervalo entre traços regular de 25m. Apesar de o dado reconstituído com ponderador apresentar mais artefatos, as diferenças são sutis. Nota-se,

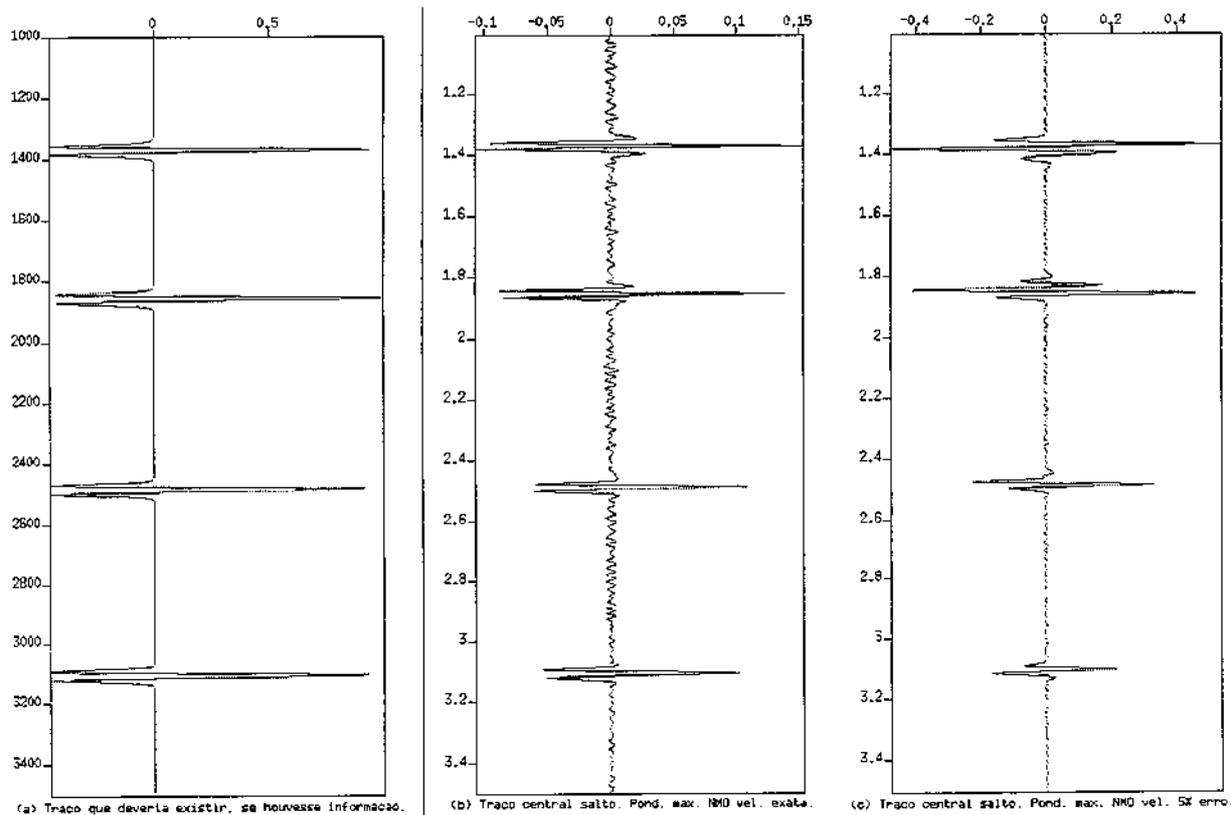


Figura 3.31: Comparação entre o traço central do trecho sem informação. (a) Traço equivalente proveniente do modelo com todos os traços; (b) Traço equivalente proveniente do dado reconstituído, controle de falseamento com ponderador máximo, NMO aplicado com velocidade exata; (c) Traço equivalente proveniente do dado reconstituído, controle de falseamento com ponderador máximo, NMO aplicado com erro de 5% na velocidade.

principalmente no evento mais profundo, uma maior continuidade do refletor no dado reconstituído com ponderador (Fig 3.34).

A comparação do dado reconstituído com os controles de falseamento que usam as distâncias de referência iguais a duas vezes e a quatro vezes a distância média entre traços é vista na Figura 3.35. Nota-se uma diminuição dos artefatos devido ao maior rigor no controle de falseamento. Também há maior continuidade dos refletores em ambos os casos quando comparados com o dado reconstituído com a distância de referência igual à distância média entre traços (Fig. 3.33a). O efeito do controle de falseamento sobre os refletores de maior mergulho, quando utiliza-se a

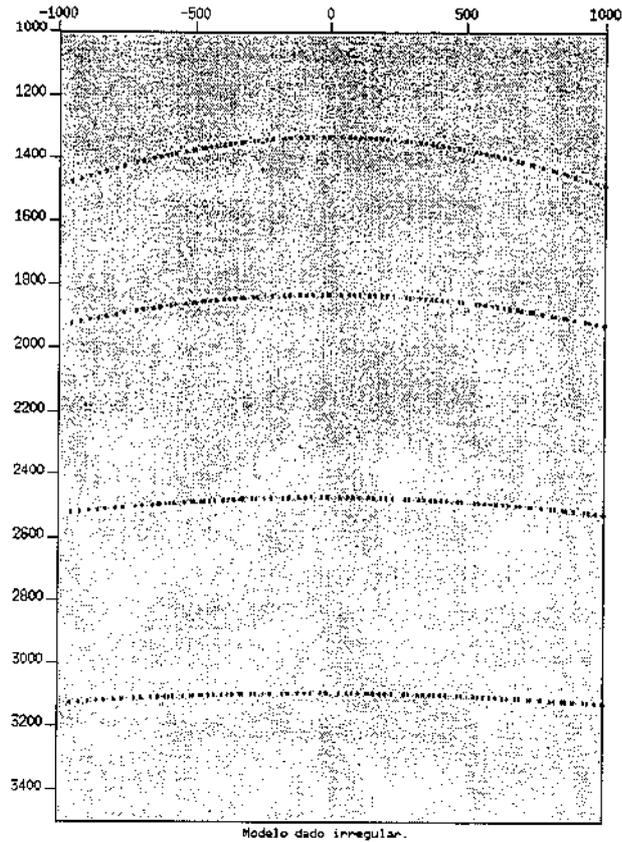


Figura 3.32: Modelo $dx = 5m$, com traços zerados, evidenciando as irregularidades. Simulação de $\Delta x \simeq 25m$ irregular.

distância de referência igual a quatro vezes a distância média entre traços, é visto na Figura 3.35b.

A Figura 3.36 mostra os sismogramas reconstituídos com os seguintes controles de falseamento: o original do algoritmo (variável apenas com p), variável com o ponderador local e variável com o ponderador máximo. Nota-se que quanto maior o rigor do controle de falseamento (ponderador máximo), menor a quantidade de artefatos existente no dado, notado, principalmente, no evento mais profundo. Convém lembrar que, para este tipo de modelo irregular, o ponderador máximo é 1,5, portanto, o controle de falseamento pelo ponderador máximo não estira os eventos de maior mergulho (Fig. 3.36c).

A seguir são comparados os sismogramas da Figura 3.36 com a correção NMO aplicada

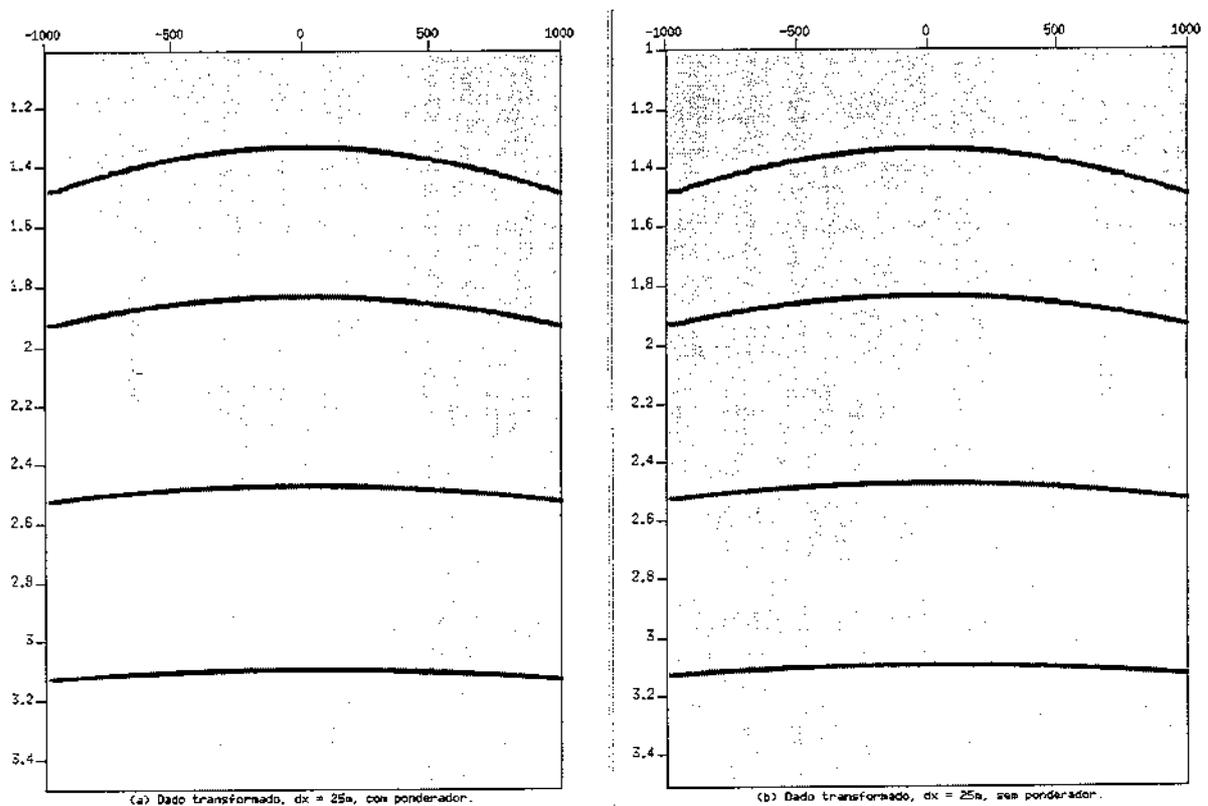


Figura 3.33: (a) Dado reconstituído, regularizado $\Delta x = 25m$, com ponderador; (b) Dado reconstituído, regularizado $\Delta x = 25m$, sem ponderador.

antes da transformada (Fig.3.37). O controle de falseamento usando o ponderador máximo com aplicação do NMO apresenta o melhor resultado, tanto na reconstituição dos eventos, quanto na pouca quantidade de artefatos deixada pela transformada, que pode ser visto no detalhe do evento de reflexão que corresponde ao refletor mais raso na Figura 3.38.

As Figuras 3.39 e 3.40 sintetizam o estudo da regularização de dados dos modelos com ausência de informação e dados amostrados irregularmente. Elas mostram os modelos referentes aos dois casos estudados com os sismogramas reconstituídos com aplicação prévia da correção de NMO e controle de falseamento usando o ponderador local e máximo, respectivamente.

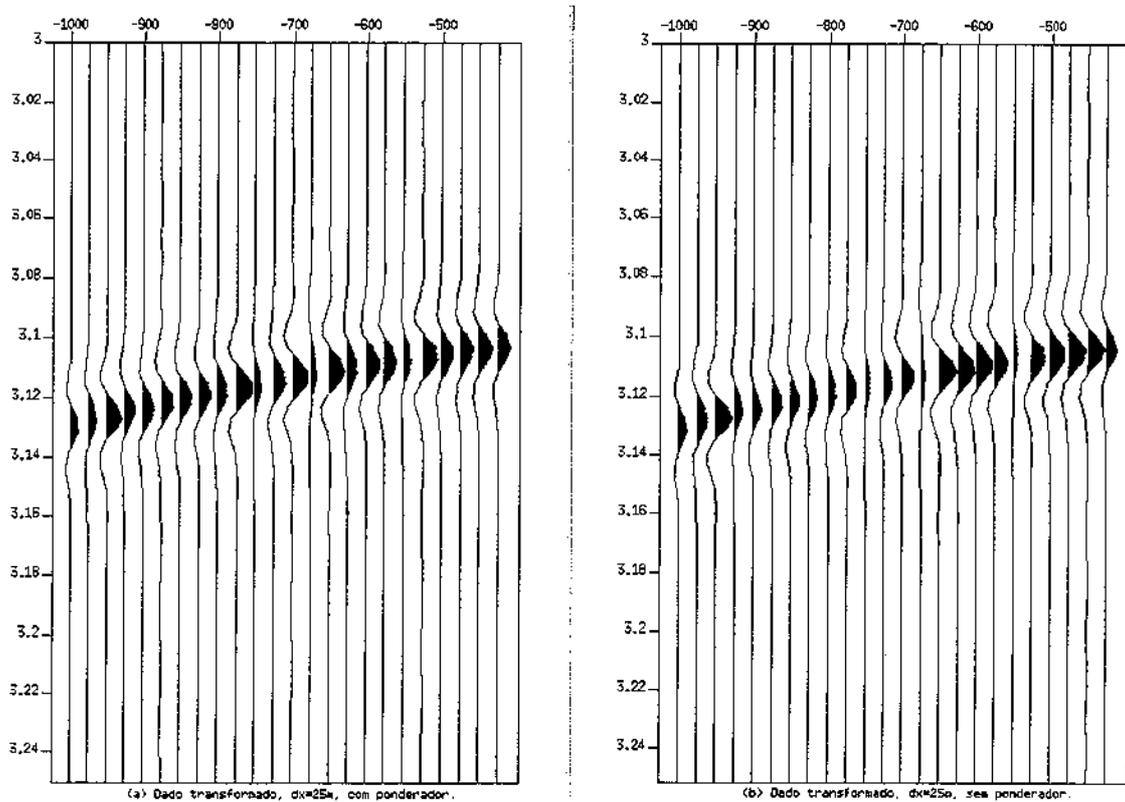


Figura 3.34: Detalhe do refletor mais profundo. (a) Dado reconstituído, regularizado $\Delta x = 25\text{m}$, com ponderador; (b) Dado reconstituído, regularizado $\Delta x = 25\text{m}$, sem ponderador.

3.3.2 Conclusões

- Para o modelo com ausência de informação em um longo trecho, o controle de falseamento usando o ponderador local fornece o melhor resultado. O controle de falseamento usando o ponderador máximo, além não reconstituir bem o dado, é mais sensível a erros de velocidade.
- No caso do modelo com o intervalo de amostragem espacial irregular, o controle de falseamento que utiliza o ponderador máximo oferece o melhor resultado, pois reconstitui satisfatoriamente os eventos e deixa menos artefatos no dado reconstituído.

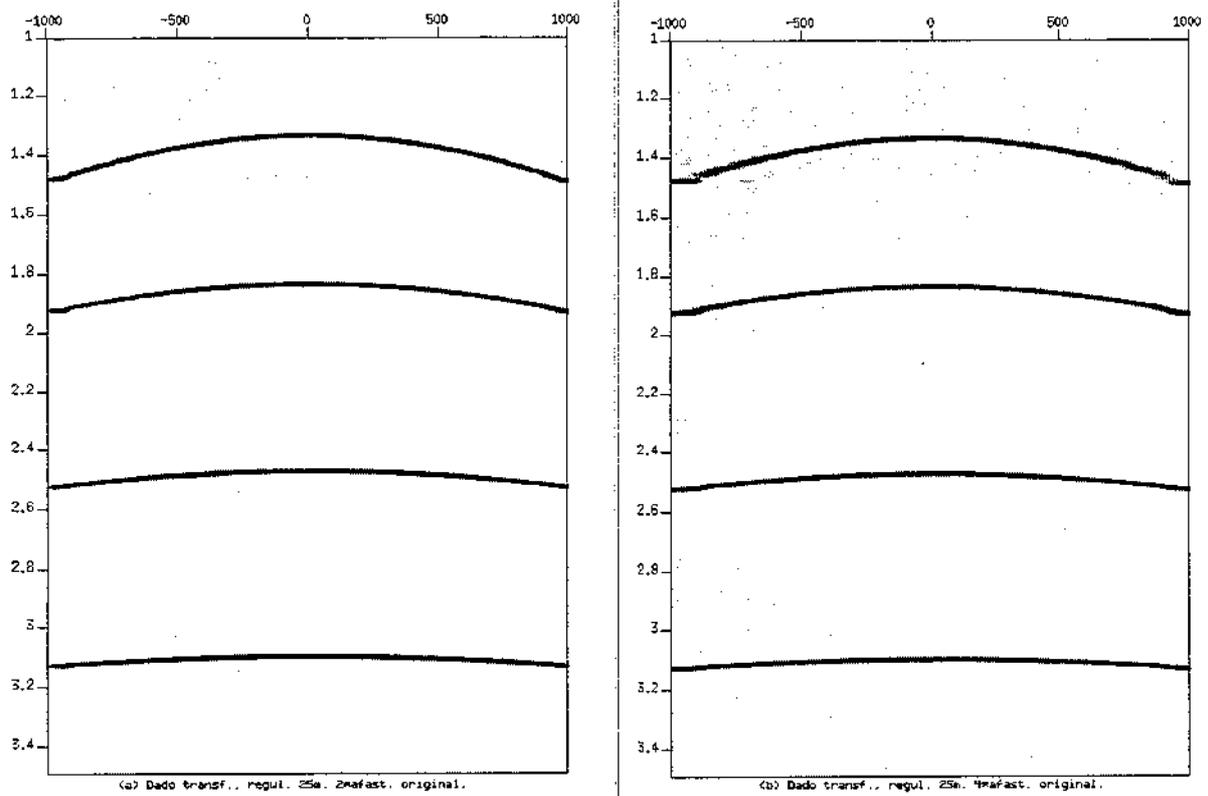


Figura 3.35: Dados reconstituídos e regularizados para $\Delta x = 25\text{m}$. (a) Reconstituído com distância de referência igual a 2 vezes a distância média entre traços; (b) Reconstituído com distância de referência igual a 4 vezes a distância média entre traços.

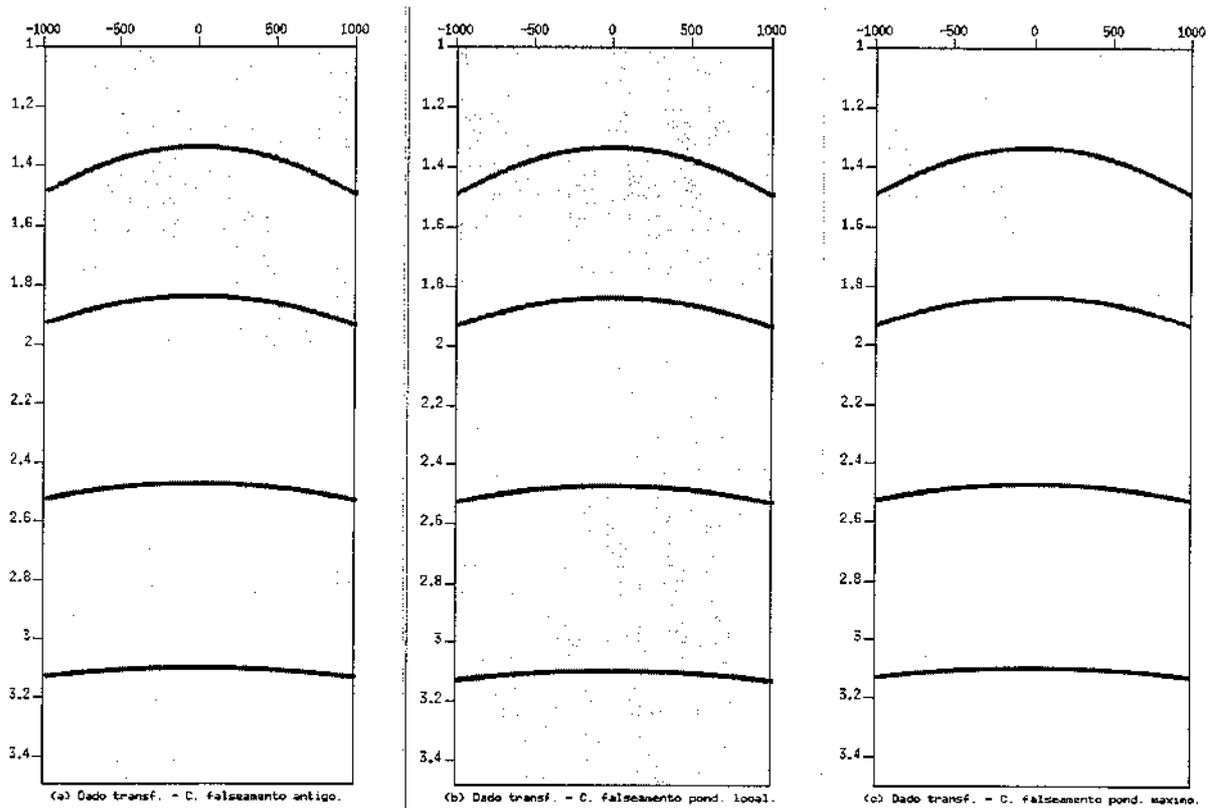


Figura 3.36: Dados reconstituídos e regularizados para $\Delta x = 25\text{m}$. (a) Controle de falseamento original; (b) Controle de falseamento usando ponderador local; (c) Controle de falseamento usando ponderador máximo.

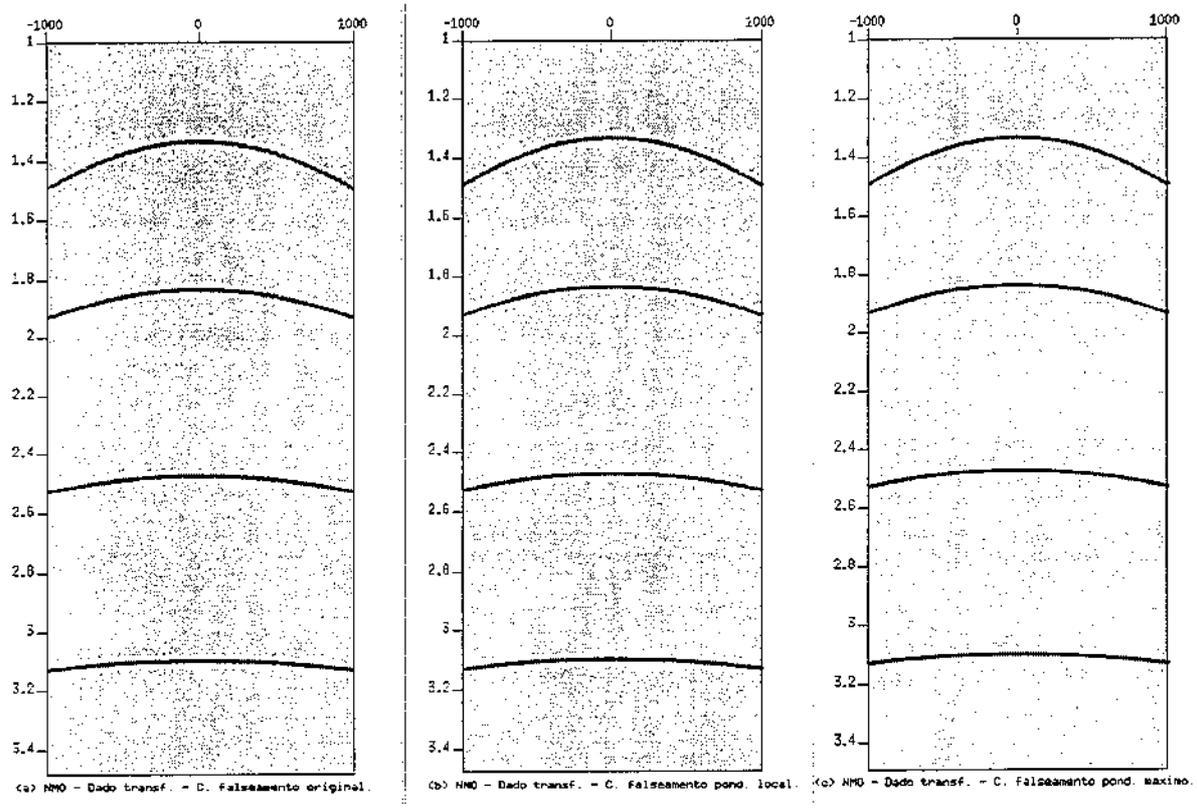


Figura 3.37: Dados reconstituídos e regularizados para $\Delta x = 25\text{m}$. Aplicação prévia de NMO. (a) Controle de falseamento original; (b) Controle de falseamento usando ponderador local; (c) Controle de falseamento usando ponderador máximo.

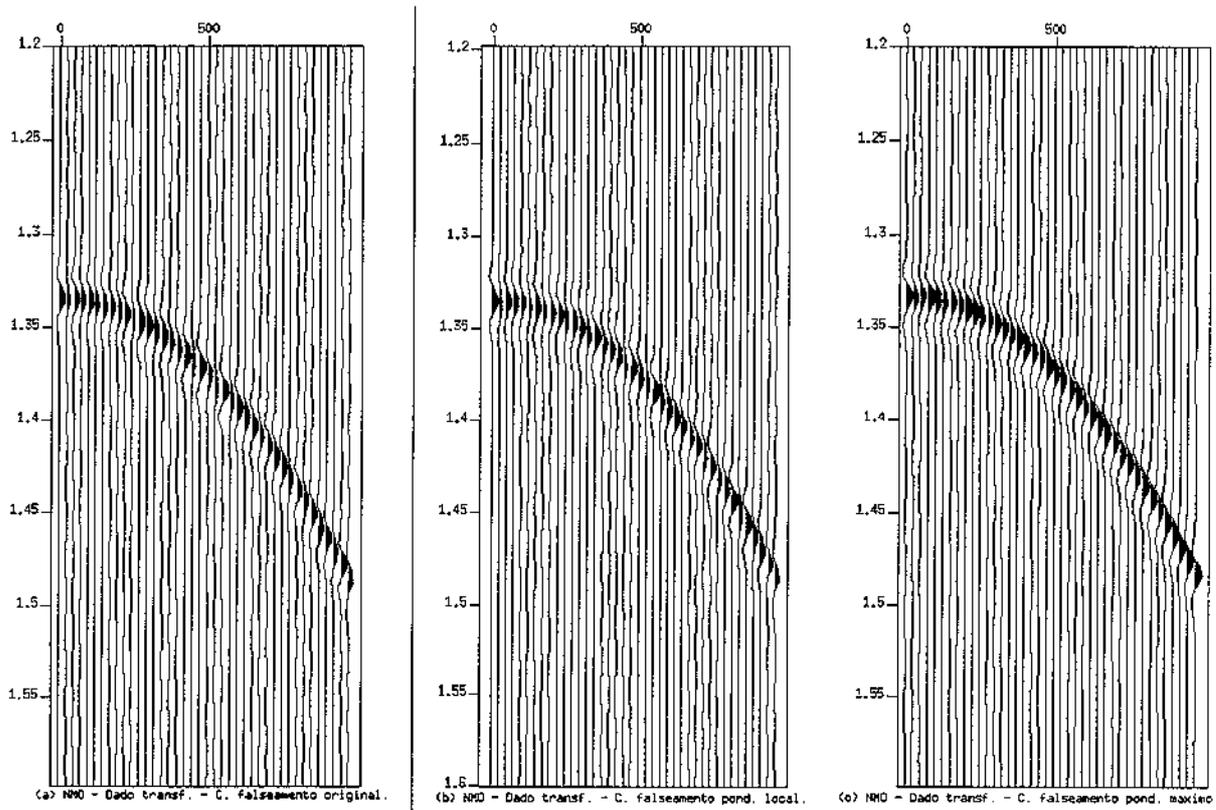


Figura 3.38: Detalhe do evento de reflexão correspondente ao refletor mais raso. Dados reconstituídos e regularizados para $\Delta x = 25\text{m}$. Aplicação prévia de NMO. (a) Controle de falseamento original; (b) Controle de falseamento usando ponderador local; (c) Controle de falseamento usando ponderador máximo.

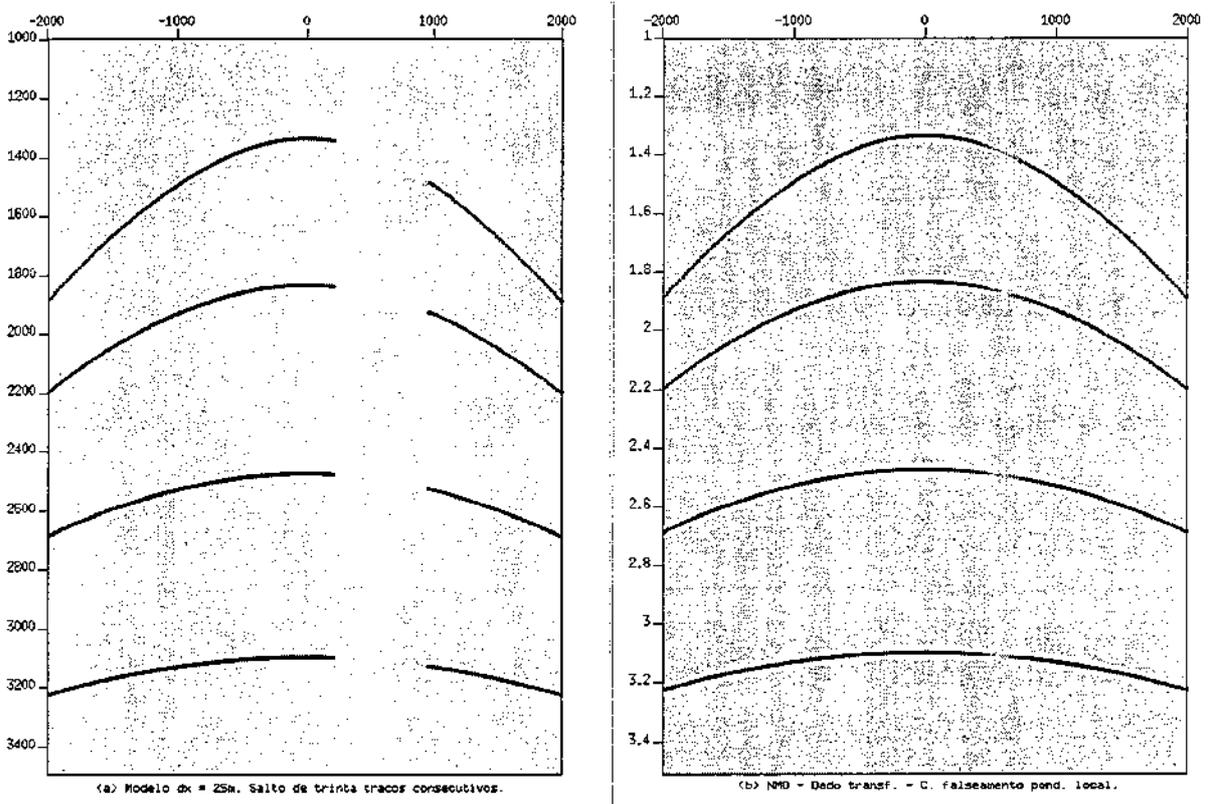


Figura 3.39: (a) Modelo sismograma $\Delta x = 25\text{m}$ com ausência de trinta traços; (b) NMO. Dado reconstituído com controle de falseamento usando o ponderador local.

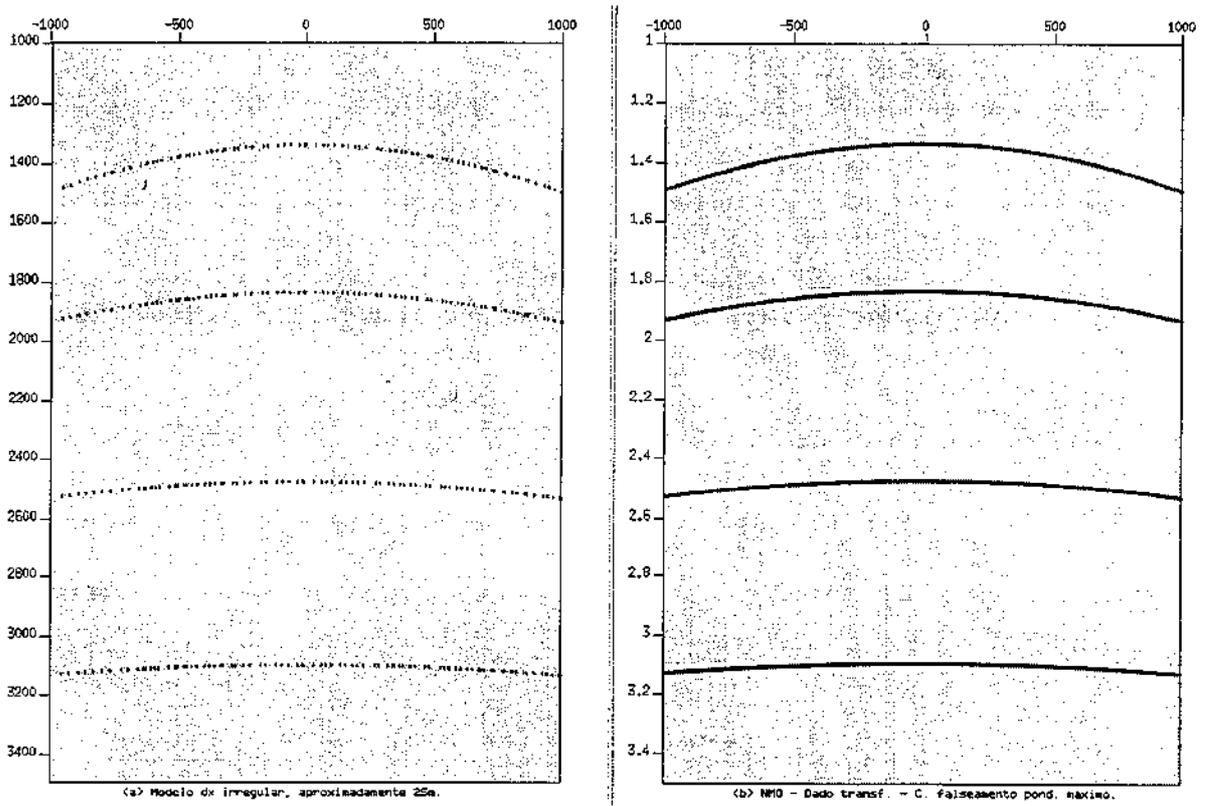


Figura 3.40: (a) Modelo sismograma Δx irregular; (b) NMO. Dado reconstituído com controle de falseamento usando o ponderador máximo, regularizado $\Delta x = 25\text{m}$.

Capítulo 4

A transformada $\tau - p$ 3D

Para realizar a transformada $\tau - p$ 3D, utiliza-se o empilhamento oblíquo 3D. Tal técnica consiste em somar os dados no domínio de entrada, $t - x - y$, ao longo de planos definidos por suas inclinações p_x e p_y e seu tempo de interseção com o eixo dos tempos, τ . O resultado é depositado em um ponto no domínio $\tau - p_x - p_y$, conforme visto na Figura 4.1.

As ondas planas podem ser definidas pela equação:

$$t = \tau + p_x x + p_y y,$$

onde τ é o tempo de interseção ou intercepto do plano com o eixo dos tempos e p_x e p_y são as inclinações que definem o plano.

Antes de realizar a soma ao longo de planos, cada traço no domínio $t - x - y$ sofre um deslocamento de tempo constante, $\Delta\tau$, que depende da posição do traço de entrada (coordenadas x e y) e da inclinação do plano ao longo do qual está sendo realizada a soma (inclinações p_x, p_y):

$$\Delta\tau = t - \tau = p_x x + p_y y.$$

Após o deslocamento em tempo, um evento que está ao longo de um plano de inclinações p_x e p_y ficará ao longo de um plano horizontal. O empilhamento é então realizado para cada traço de coordenadas (x, y) ao longo do plano horizontal. Esse processo é repetido para vários planos (variando p_x e p_y).

O empilhamento oblíquo 3D para a transformada direta pode ser representado pela equação

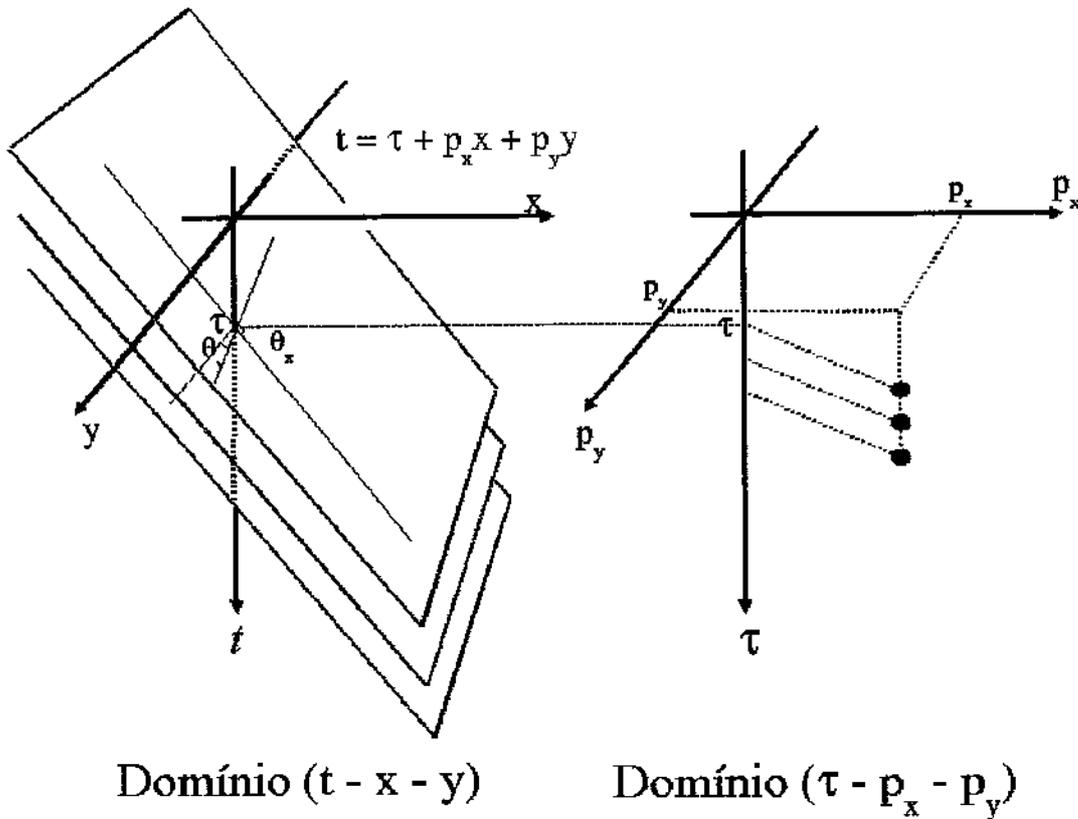


Figura 4.1: Transformada $\tau - p$ 3D, onde três planos paralelos no domínio $t - x - y$, de inclinações p_x e p_y , porém com diferentes valores de τ , são transformados em 3 pontos no domínio $\tau - p_x - p_y$.

(Chapman, 1981):

$$V(\tau, p_x, p_y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} u(\tau + p_x x + p_y y, x, y) dx dy, \quad (4.1)$$

onde, $V(\tau, p_x, p_y)$ é o dado no domínio $\tau - p$ após a transformada $\tau - p$ do dado de entrada $u(t, x, y)$, τ é o tempo de interseção do plano com o eixo dos tempos; p_x e p_y são as inclinações do plano e x e y são as coordenadas do traço do dado de entrada.

A transformada inversa é dada por (Chapman, 1981):

$$u(t, x, y) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} U(t - p_x x - p_y y, p_x, p_y) dp_x dp_y, \quad (4.2)$$

onde, $U(\tau, p_x, p_y)$ representa a derivada segunda em tempo da transformada de Hilbert do dado $V(\tau, p_x, p_y)$. Como esta operação não depende de p_x e p_y , pode ser separada da integral e é

equivalente à convolução pelo *filtro rho 3D* no domínio do tempo:

$$u(t, x, y) = \rho_{3D}(t) * \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} V(t - p_x x - p_y y, p_x, p_y) dp_x dp_y,$$

onde $\rho_{3D}(t)$ é a transformada inversa de Fourier da função $\omega^2/4\pi^2$, chamada de *filtro rho 3D* ou *filtro rampa 3D* e o sinal “*” indica uma operação de convolução.

Também para o caso 3D, o *filtro rho 3D* será dividido em duas partes, segundo sugestão de Claerbout (1985), sendo $|\omega|/2\pi$ aplicada durante a transformada direta e $|\omega|/2\pi$ aplicada durante a transformada inversa, como é visto na descrição do algoritmo.

Lembrando que as operações descritas pelas equações 4.1 e 4.2 representam uma verdadeira decomposição de um campo de ondas registrado, gerado por uma fonte pontual, em um conjunto de ondas planas num meio tridimensional.

4.1 Transformada $\tau - p$ 3D por Transformada de Fourier

Para realizar o empilhamento oblíquo 3D, também foi utilizada a propriedade do deslocamento em tempo da Transformada de Fourier (Apêndice A). Uma vez calculados os deslocamentos em tempo, $\Delta\tau$, e transformado o dado de entrada para o domínio da frequência, basta multiplicá-lo pela fase $e^{-i\omega\Delta\tau}$, onde $\Delta\tau = p_x x + p_y y$.

Discretizando a equação (4.1), tem-se:

$$V(\tau, p_x, p_y) = \sum_{k=1}^n \sum_{\ell=1}^m u(\tau + p_x x_k + p_y y_\ell, x_k, y_\ell) \Delta x \Delta y. \quad (4.3)$$

Usando a propriedade do deslocamento da Transformada de Fourier:

$$\begin{aligned} \mathcal{F}\{u(\tau + p_x x_k + p_y y_\ell, x_k, y_\ell)\} &= e^{-i\omega(p_x x_k + p_y y_\ell)} \hat{u}(\omega, x_k, y_\ell); \\ u(\tau + p_x x_k + p_y y_\ell, x_k, y_\ell) &= \mathcal{F}^{-1}\{e^{-i\omega(p_x x_k + p_y y_\ell)} \hat{u}(\omega, x_k, y_\ell)\}. \end{aligned} \quad (4.4)$$

Substituindo a equação (4.4) em (4.3), tem-se:

$$V(\tau, p_x, p_y) = \sum_{k=1}^n \sum_{\ell=1}^m \mathcal{F}^{-1}\{e^{-i\omega(p_x x_k + p_y y_\ell)} \hat{u}(\omega, x_k, y_\ell)\} \Delta x \Delta y,$$

ou ainda,

$$V(\tau, p_x, p_y) = \mathcal{F}^{-1}\left\{\sum_{k=1}^n \sum_{\ell=1}^m e^{-i\omega(p_x x_k + p_y y_\ell)} \hat{u}(\omega, x_k, y_\ell)\right\} \Delta x \Delta y,$$

onde, os deslocamentos em tempo são $\Delta\tau_{kl} = p_x x_k + p_y y_l$.

4.2 Descrição do algoritmo

O algoritmo para realizar a transformada direta $\tau - p$ 3D é apresentado nesta seção. Lembrando que, na transformada inversa, o dado de entrada no domínio da frequência também está sendo multiplicado por $\frac{|\omega|}{2\pi}$.

1. Entrada: dado organizado por tiro comum ou CMP.
2. Aplica-se a transformada de Fourier em relação ao tempo do dado complexo. A saída é um dado complexo no domínio $\omega - x - y$.

$$\hat{u}(\omega, x, y) = \mathcal{F}\{u(t, x, y)\}.$$

3. Controle de falseamento. Para cada parâmetro do raio p_y e para cada p_x , é calculada a maior frequência para que o dado não seja falseado.
4. Para cada parâmetro do raio p_y e para cada p_x , são calculados os deslocamentos em tempo ($\Delta\tau$) que são invariantes para cada traço de coordenadas (x, y) .

$$\Delta\tau = p_x x + p_y y.$$

5. Realiza-se o empilhamento oblíquo no domínio da frequência $\omega - x - y$, utilizando a propriedade do deslocamento da Transformada de Fourier, descrita no Apêndice A. Sendo assim, o dado passa do domínio $\omega - x - y$ para $\omega - p_x - p_y$.

$$\tilde{V}(\omega, p_x, p_y) = \frac{|\omega|}{2\pi} \sum_k \sum_\ell e^{-i\omega(p_x x_k + p_y y_\ell)} \hat{u}(\omega, x_k, y_\ell) \Delta x \Delta y.$$

6. Aplica-se a transformada inversa de Fourier, o dado passa do domínio $\omega - p_x - p_y$ para $\tau - p_x - p_y$.

$$V(\tau, p_x, p_y) = \mathcal{F}^{-1}\{\tilde{V}(\omega, p_x, p_y)\}$$

4.3 Parametrização da transformada $\tau - p$ 3D

A parametrização de p e o tipo de geometria de aquisição (intervalo entre receptores, Δx , quantidade de linhas de receptores, etc.) necessária para a realização da transformada 3D adequada são discutidos nesta seção.

O modelo geológico utilizado é o equivalente 3D do modelo de camadas planas horizontais de velocidades constantes (Fig.4.2). Os sismogramas de tiro comum 3D foram gerados com um pulso da fonte do tipo Ricker de 72ms de duração e possuem as seguintes características:

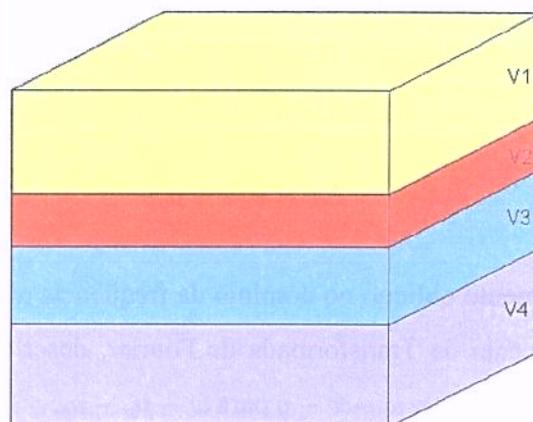


Figura 4.2: Modelo geológico 3D de camadas planas horizontais com velocidades constantes

- Sismograma 3D de lançamento bipartido simétrico (receptores de ambos os lados do tiro). Cinco linhas de tiro.

lanço: -1250m a 1250m

abertura em y : 800m

Δx : 50 m

n_x : 51

n_y : 5

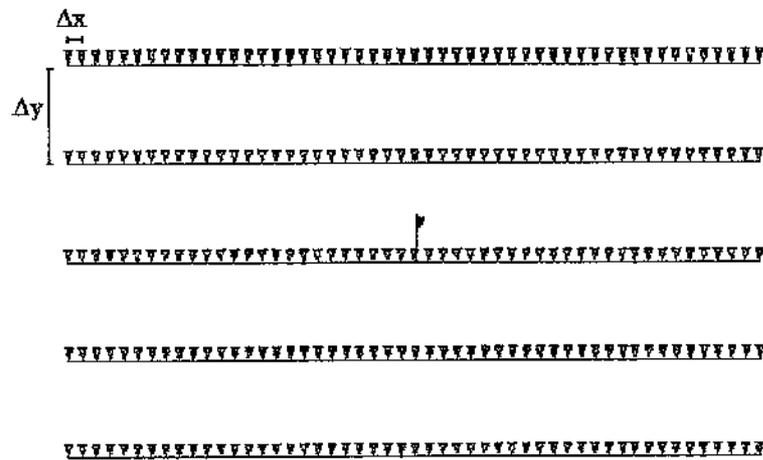
Δy : 200m

- Sismograma 3D de lanço "end-on" (receptores de um só lado do tiro). Cinco linhas de tiro.
lanço: 0 a 2000m
abertura em y : 800m
 Δx : 50 m
 n_x : 41
 n_y : 5
 Δy : 200m

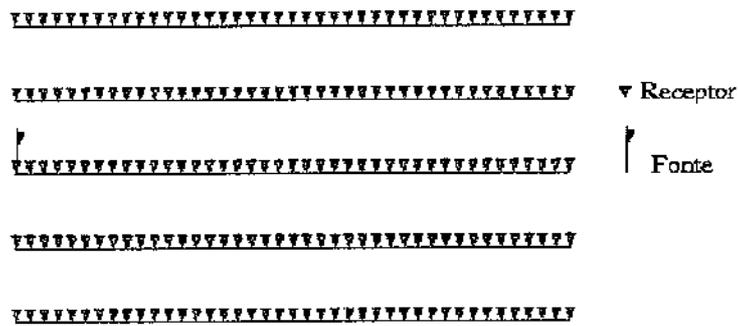
A Figura 4.3 mostra os dispositivos de registro de campo que geraram os dois sismogramas acima. O sismograma 3D com lanço bipartido $n_x = 51$ e $n_y = 5$ é visto na Figura 4.4, simulando o cubo da aquisição sísmica. Na Figura 4.5, o mesmo sismograma 3D é visto com todas as linhas lado a lado. O sismograma 3D referente ao modelo com lanço "end-on" $n_x = 41$ e $n_y = 5$ é visto na Figura 4.6.

Outros sismogramas foram gerados de maneira que não houvesse assimetria entre as amostras nas direções espaciais x e y , ou seja, aumentando o número de linhas sísmicas e diminuindo o intervalo entre elas (Δy):

- Sismograma 3D de lanço bipartido simétrico (receptores de ambos os lados do tiro). 51 linhas de tiro.
lanço: -1250m a 1250m
abertura em y : 2500m
 Δx : 50 m
 n_x : 51
 n_y : 51
 Δy : 50m
- Sismograma 3D de lanço "end-on" (receptores de um só lado do tiro). 41 linhas de tiro.
lanço: 0 a 2000m
abertura em y : 2000m



(a) Lanço Bipartido Simétrico



(a) Lanço "End-on"

Figura 4.3: Dispositivo de registro. (a) Lanço bipartido simétrico -1250m a 1250m. $n_x = 51$, $\Delta x = 50\text{m}$, $n_y = 5$ e $\Delta y = 200\text{m}$; (b) Lanço "end-on" 0 a 2000m. $n_x = 41$, $\Delta x = 50\text{m}$, $n_y = 5$ e $\Delta y = 200\text{m}$.

$\Delta x : 50 \text{ m}$

$n_x : 41$

$n_y : 41$

$\Delta y : 50\text{m}$

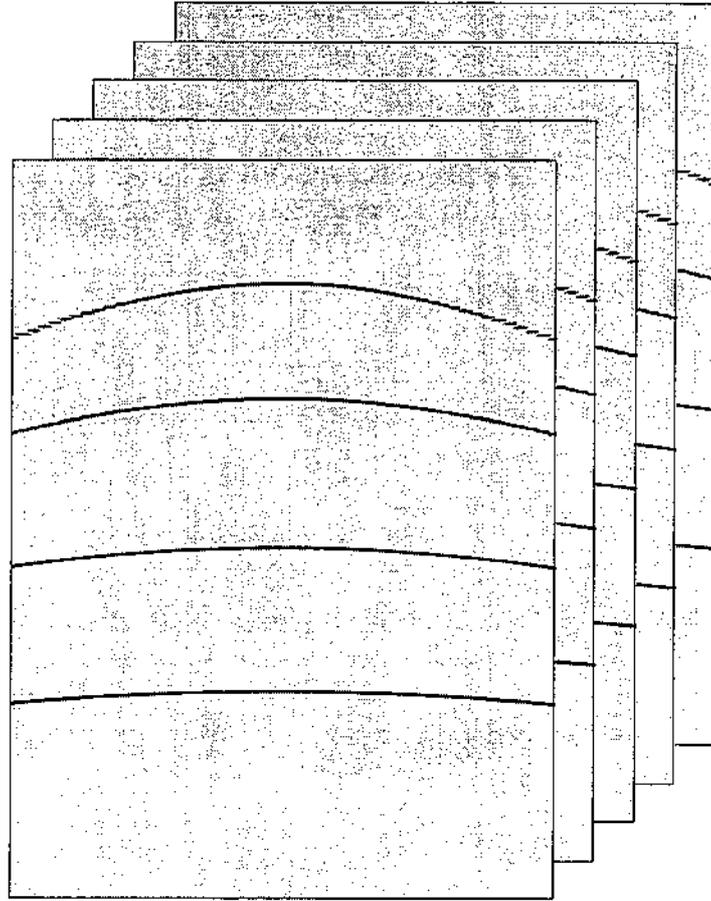


Figura 4.4: Sismograma 3D. Lanço bipartido simétrico -1250m a 1250m. $n_x = 51$, $\Delta x = 50\text{m}$, $n_y = 5$ e $\Delta y = 200\text{m}$.

4.4 Falseamento

Nesta seção, são discutidos os resultados obtidos com a transformada $\tau - p$ 3D aplicada aos sismogramas com lanços do tipo bipartido simétrico e "end-on". O controle de falseamento do algoritmo é igual ao caso 2D, porém aplicado também à direção y . Para a transformada direta tem-se os controles:

$$f_{\text{NYQ}}(\Delta x, p_x) = \frac{1}{2p_x \Delta x}, \quad (4.5)$$

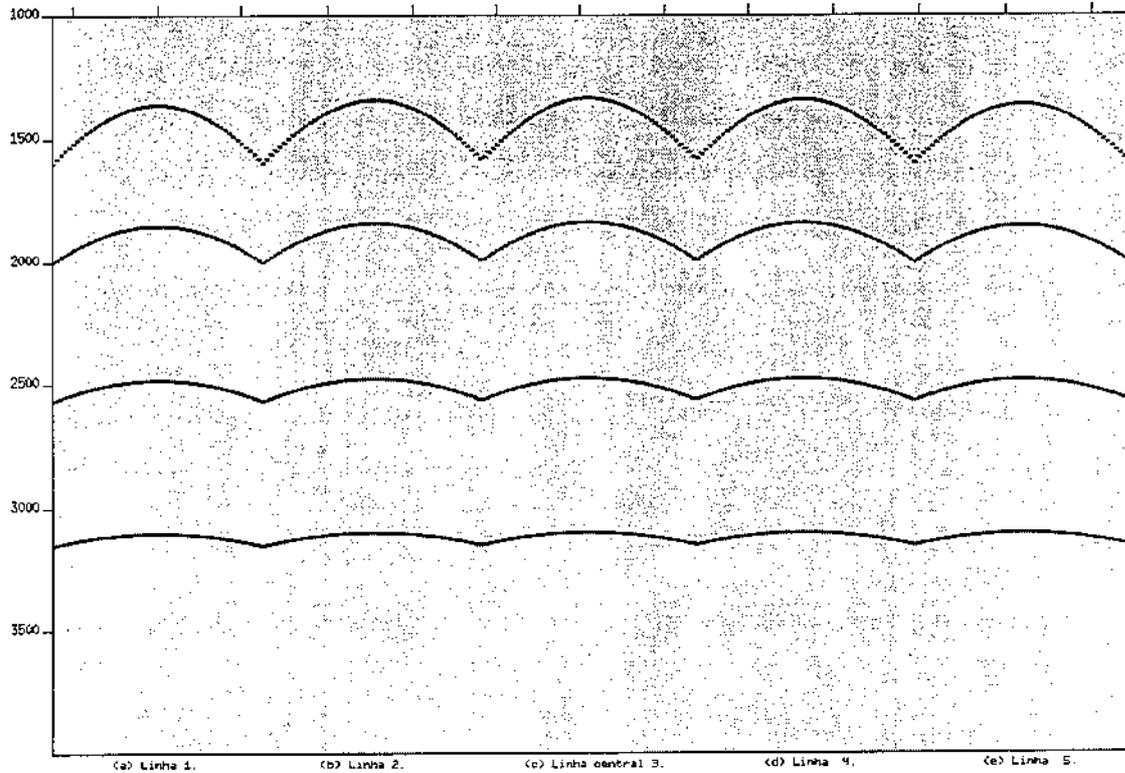


Figura 4.5: Sismograma 3D. Lanço bipartido simétrico -1250m a 1250m, com os parâmetros $n_x = 51$, $\Delta x = 50\text{m}$, $n_y = 5$ e $\Delta y = 200\text{m}$. Linhas lado a lado ; (a) Linha 1, afastamento y em relação à fonte de -400m; (b) Linha 2, $a_{fasty} = -200\text{m}$; (c) Linha central 3, $a_{fasty} = 0\text{m}$; (d) Linha 4, $a_{fasty} = 200\text{m}$; (e) Linha 5, $a_{fasty} = 400\text{m}$.

onde, p_x corresponde à inclinação do plano com o eixo espacial x e Δx é o intervalo de amostragem espacial na direção x e

$$f_{NYQ}(\Delta y, p_y) = \frac{1}{2p_y \Delta y}, \quad (4.6)$$

onde, p_y corresponde à inclinação do plano com o eixo espacial y e Δy é o intervalo de amostragem espacial na direção y .

Num levantamento marítimo 3D, Δx corresponde ao intervalo entre hidrofones e Δy , à distância entre cabos. Num levantamento terrestre, Δx corresponde ao intervalo entre geofones e Δy , ao intervalo entre linhas de receptores.

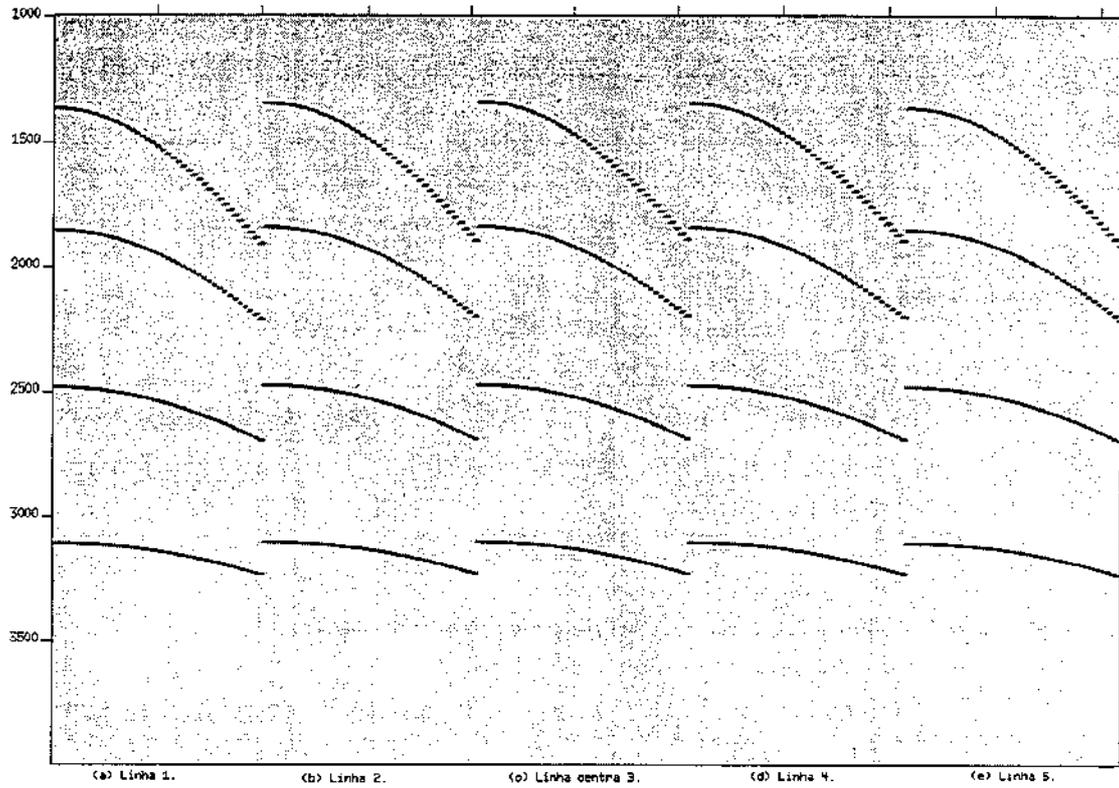


Figura 4.6: Sismograma 3D. Lanço "end-on" 0 a 2000m, com os parâmetros $n_x = 41$, $\Delta x = 50\text{m}$, $n_y = 5$ e $\Delta y = 200\text{m}$. Linhas lado a lado ; (a) Linha 1, afastamento y em relação à fonte de -400m ; (b) Linha 2, $\text{afast}y = -200\text{m}$; (c) Linha central 3, $\text{afast}y = 0\text{m}$; (d) Linha 4, $\text{afast}y = 200\text{m}$; (e) Linha 5, $\text{afast}y = 400\text{m}$.

Correspondente, para a transformada inversa 3D, a frequência de Nyquist é dada por:

$$f_{\text{NYQ}}(x, \Delta p_x) = \frac{1}{2x\Delta p_x}, \quad (4.7)$$

$$f_{\text{NYQ}}(y, \Delta p_y) = \frac{1}{2y\Delta p_y}, \quad (4.8)$$

onde, x e y são as inclinações que definem um plano no domínio $\tau-p$, sobre o qual o empilhamento oblíquo está sendo calculado e Δp_x e Δp_y são os intervalos de amostragem nas direções p_x e p_y , respectivamente.

O estudo do falseamento p para o caso 3D segue as mesmas premissas que o discutido para o caso 2D. Nesta seção, os dados 3D são reconstituídos com os parâmetros p calculados segundo a sugestão de Turner, onde a reconstituição do evento de reflexão é adequada, porém com o aumento de np_x e np_y , diminui-se a quantidade de artefatos no dado reconstituído.

Adaptando a parametrização em p para o caso 3D, calculada por Nyquist e segundo o sugerido por Turner (1990):

- Parametrização por Nyquist:

$$\Delta p_x = \frac{1}{2X_I f_{max}},$$

$$\Delta p_y = \frac{1}{2Y_I f_{max}},$$

onde, X_I e Y_I são os intervalos dos valores de x e y , ou seja, os equivalentes ao lanço na direção x e à abertura na direção y , respectivamente; e f_{max} é a maior frequência presente no dado.

- Regra sugerida por Turner:

$$\Delta p_x < \frac{1}{X_I f_{max}}$$

$$\Delta p_y < \frac{1}{Y_I f_{max}}$$

O número de valores de p_x e p_y são calculados:

$$np_x = \frac{p_{xmax} - p_{xmin}}{\Delta p_x}$$

$$np_y = \frac{p_{ymax} - p_{ymin}}{\Delta p_y},$$

onde, p_{xmax} , p_{xmin} , p_{ymax} e p_{ymin} são os maiores e menores valores de p nas direções p_x e p_y , respectivamente.

4.5 Testes de Falseamento

Alguns testes da transformada $\tau - p$ 3D são realizados nesta seção. Os modelos com os lanços bipartido e "end-on" são transformados para o domínio $\tau - p$ sempre com Δp inferior ao sugerido por Turner. Para que um dado 3D seja reconstituído corretamente, além dos parâmetros em p bem dimensionados, necessita-se de haver uma boa amostragem espacial nas direções x e y . Nos levantamentos 3D atuais, o comprimento do cabo com os receptores ativos (aqui chamado de lanço) e o intervalo entre receptores Δx não representam problemas para a transformada $\tau - p$, pois, é comum, em levantamentos marítimos, lanços da ordem de 6km e intervalos entre hidrofones menores que 25m. Mas, a amostragem e a abertura na direção y , representadas pelo intervalo entre cabos Δy e a abertura Y_I podem ser ainda fatores que limitam o uso da transformada $\tau - p$ 3D. Os testes a seguir mostrarão os efeitos causados pela limitação de Δy e Y_I .

Em todas as figuras das transformadas $\tau - p$ 3D, são comparadas as linhas centrais, ou seja, as linhas que contêm o tiro. Nos eixos x , y e t são vistos os números das amostras, sendo que o respectivos afastamentos em todas as direções são especificados nas legendas. Em todas as transformadas foram usados $p_{xmax} = p_{ymax} = -p_{xmin} = -p_{ymin} = 0.000667$, ou seja o inverso da menor velocidade do modelo (1500m/s).

4.5.1 Testes com o sismograma com lanço bipartido simétrico

Para confirmar o que foi mostrado no caso 2D, o sismograma 3D com lanço bipartido simétrico, com $n_x = 51$ e 5 linhas de receptores (Fig. 4.5) foi transformado (dado em que foi aplicado as transformadas direta e inversa) com $np_x = 187$ e $np_y = 59$, sugerido por Turner (Fig. 4.7a) e com $np_x = 375$ e $np_y = 119$, calculado por Nyquist (Fig. 4.7b). Nota-se que em ambos os casos todos os eventos são recuperados satisfatoriamente, a diferença está na maior quantidade de ruídos no dado reconstituído com parâmetros calculados por Turner (Fig. 4.8)

Mesmo com os valores de np_x e np_y calculados por Turner e Nyquist, ainda há artefatos no dado reconstituído. A Figura 4.9 mostra a transformada do modelo com simetria entre as amostragens nos eixos espaciais x e y : com $n_x = n_y = 51$ e $\Delta x = \Delta y = 50m$. Os parâmetros em p utilizados na transformada foram $np_x = np_y = 201$ (um pouco maior que o sugerido por Turner:

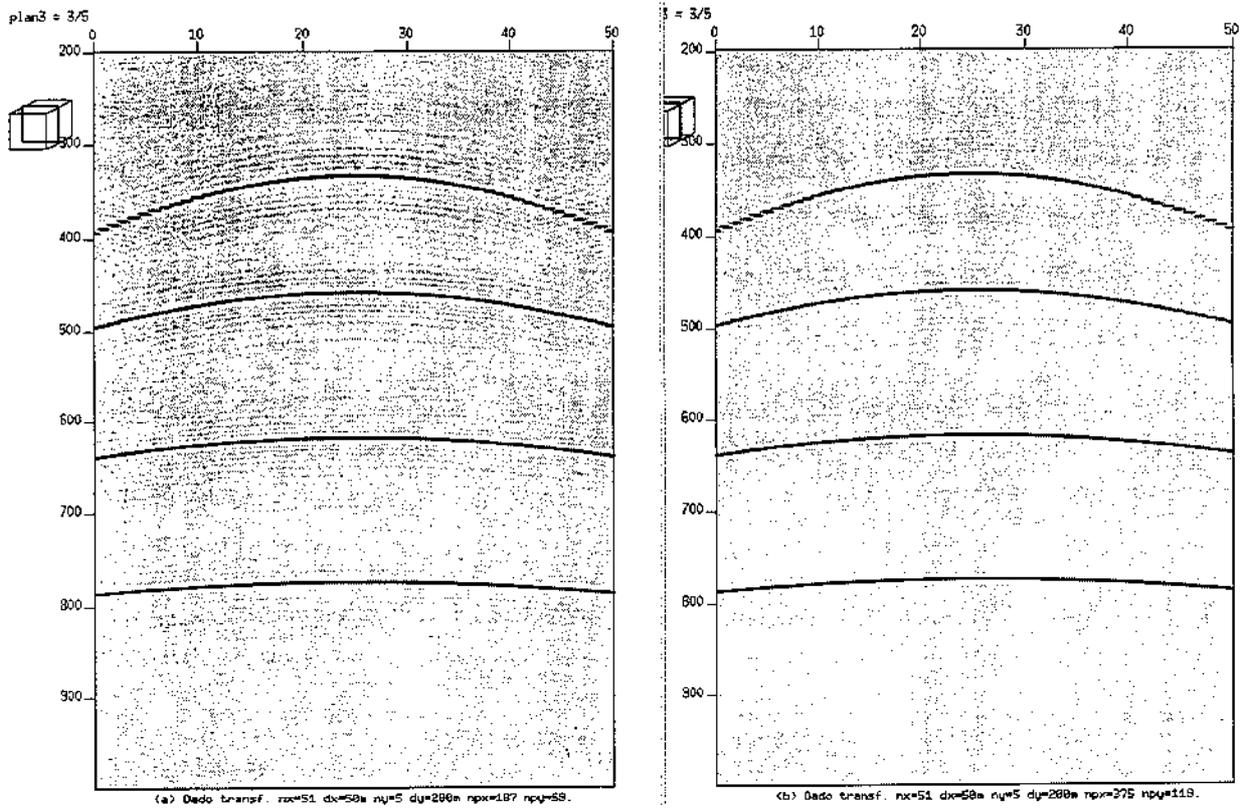


Figura 4.7: Dado reconstituído 3D com controle de falseamento. Lanço bipartido simétrico -1250m a 1250m. $n_x = 51$, $\Delta x = 50\text{m}$, $n_y = 5$ e $\Delta y = 200\text{m}$. (a) $np_x = 187$ e $np_y = 59$ (b) $np_x = 375$ e $np_y = 119$.

187). Quando são comparados os traços centrais da linha central 26 (Fig. 4.10), percebe-se que a quantidade de artefatos diminuiu significativamente em relação ao modelo de 5 linhas na direção y (Fig. 4.8c).

A Figura 4.11 mostra outras duas seções deste dado reconstituído 3D: uma seção paralela ao plano $t - y$ ($n_y = 26$) e um corte paralelo ao plano $x - y$ ("time-slice" $t = 1.38\text{s}$). Esse "time-slice" localiza-se próximo ao ápice do evento de reflexão mais raso. As localizações desses cortes são mostradas no canto superior direito de cada figura.

Como o modelo 3D $n_x = n_y = 51$ é simétrico em relação aos eixos espaciais, os cortes paralelos aos planos $t - p_y$ e $t - p_x$ são iguais. A Figura 4.12 mostra um corte paralelo ao plano

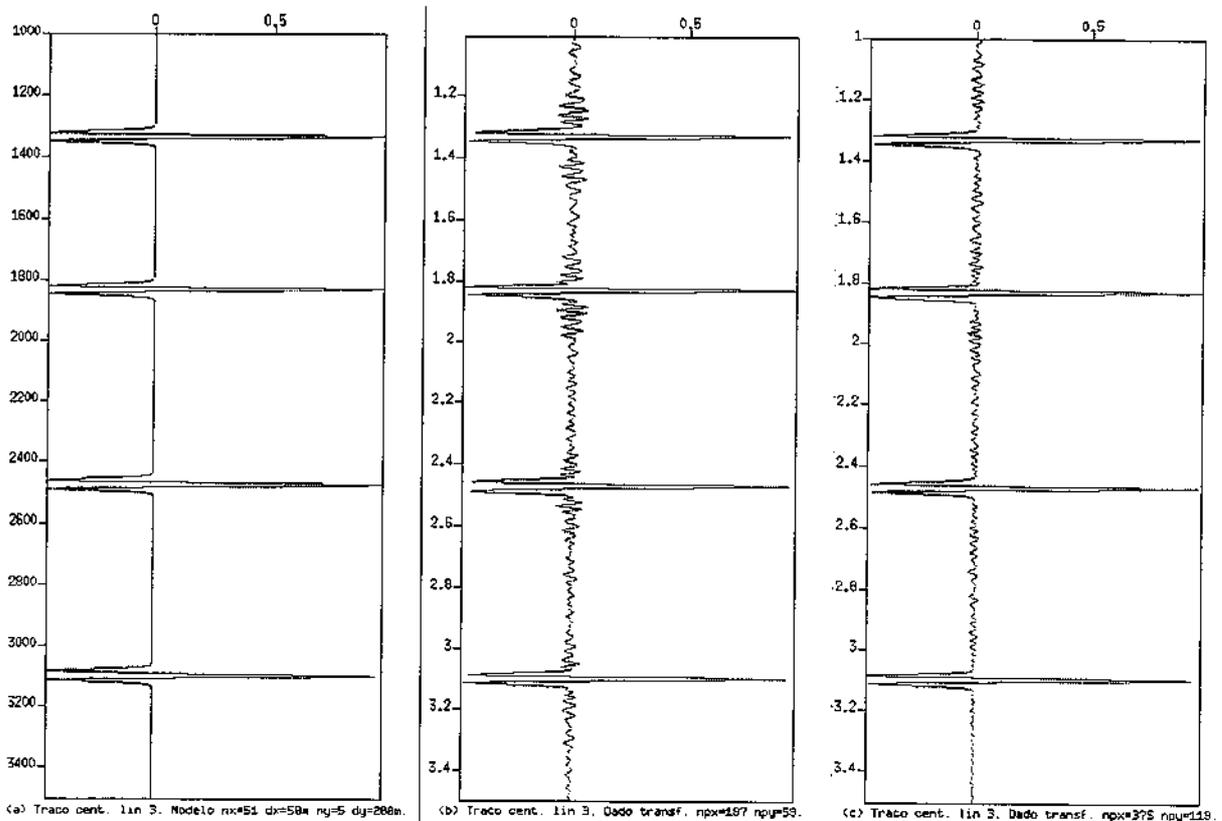


Figura 4.8: Amplitude do traço central da linha central 3 (a) Modelo 3D, lança bipartido simétrico -1250m a 1250m. $n_x = 51$, $\Delta x = 50\text{m}$, $n_y = 5$ e $\Delta y = 200\text{m}$, escala de tempo em ms; (b) Dado reconstituído com $np_x = 187$ e $np_y = 59$ (c) Dado reconstituído com $np_x = 375$ e $np_y = 119$. (b) e (c) com escala de tempo em s.

$t - p_y$, $np_y = 101$, e um "time-slice", $t = 1.16\text{s}$, ambos no domínio $\tau - p$ (transformada direta).

Também pode ser visto na Figura 4.13 como variam as amplitudes ao longo do refletor mais profundo da linha central ($n_x = 26$) do dado reconstituído em questão ($n_x = n_y = 51$) com $np_x = np_y = 201$ comparado com as do modelo de entrada .

4.5.2 Testes com o sismograma com lança "end-on"

O sismograma 3D com lança do tipo "end-on" foi reconstituído com Δp_x e Δp_y calculados por Turner e Nyquist:

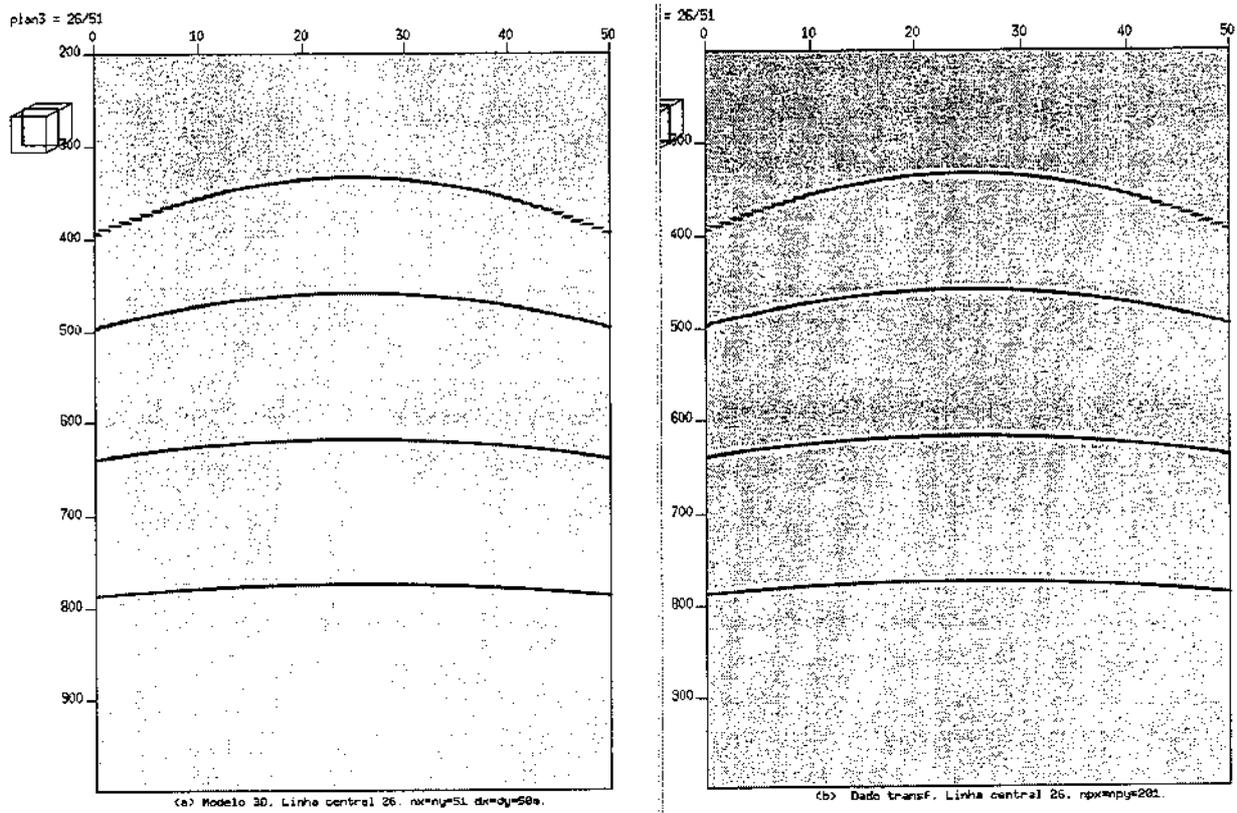


Figura 4.9: (a) Modelo de entrada $n_x = n_y = 51$, $\Delta x = \Delta y = 50\text{m}$; (b) Dados reconsituídos $n_{p_x} = n_{p_y} = 201$.

- Turner: $\Delta p_x = 0.00000893$ $n_{p_x} = 149$. $\Delta p_y = 0.0000223$ $n_{p_y} = 59$.
- Nyquist: $\Delta p_x = 0.00000446$ $n_{p_x} = 299$. $\Delta p_y = 0.0000112$ $n_{p_y} = 119$.

O sismograma modelo "end-on" ($n_{p_x} = 41$, $\Delta x = 50\text{m}$, $n_{p_y} = 5$ e $\Delta y = 200\text{m}$), visto na Figura 4.6), é reconstruído com os parâmetros p calculados por Turner e Nyquist (Fig. 4.14). Nota-se que os valores calculados por Turner não foram suficientes para reconstituir os eventos de maior mergulho, evidente, neste caso, no evento mais profundo e nos afastamentos maiores, em torno de 2000m (Fig. 4.14a).

Os artefatos diminuem à medida que aumenta-se o número de p nas duas direções, que pode ser notado observando as amplitudes dos primeiros traços da linha central (Fig. 4.15).

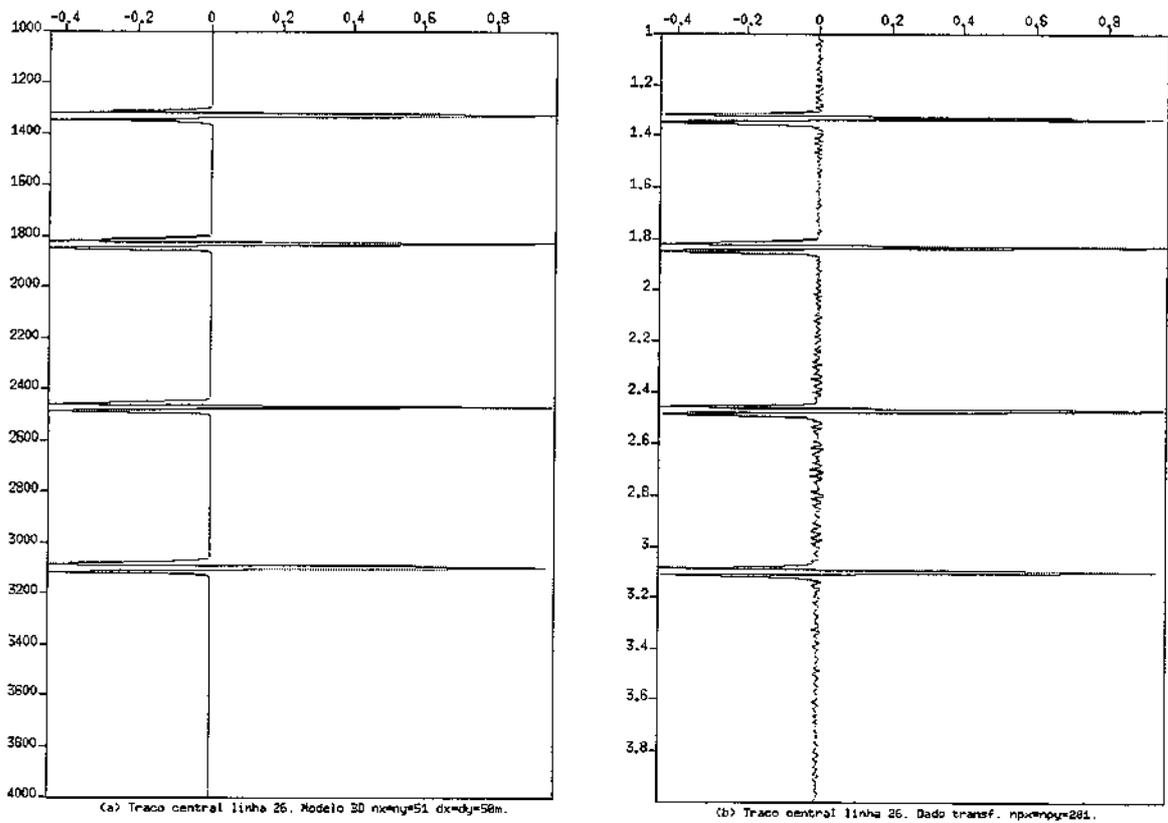


Figura 4.10: Amplitude do traço central da linha central 26. (a) Modelo 3D, lança bipartido simétrico - 1250m a 1250m. $n_x = n_y = 51$, $\Delta x = \Delta y = 50m$, escala de tempo em ms; (b) Dado reconstituído com $n_{p_x} = n_{p_y} = 201$, escala de tempo em s.

O teste com o equivalente simétrico do modelo "end-on" é visto na Figura 4.16. Este modelo possui $n_x = n_y = 41$ e $\Delta x = \Delta y = 50m$ e é reconstituído com os parâmetros p calculados por Turner. Ainda é visto o estiramento do evento mais profundo nos afastamentos maiores.

Porém, na figura 4.17, pode ser vista a diminuição da quantidade de ruídos no primeiro traço da linha central quando comparados apenas o aumento da abertura em y e o aumento das amostras nesta direção. Neste caso, os dois modelos são reconstituídos com os parâmetros p calculados por Turner.

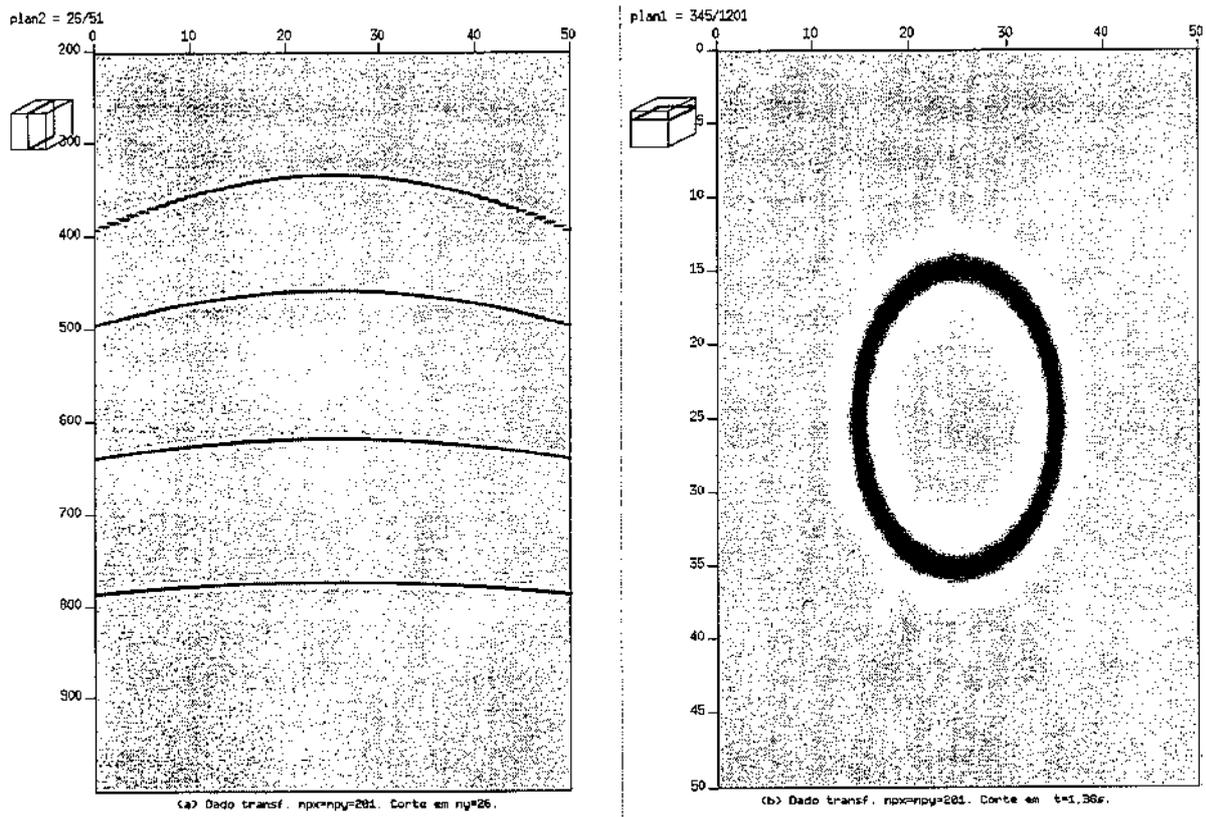


Figura 4.11: Simograma 3D. Dado reconstituído $np_x = np_y = 201$. (a) Seção $ny = 26$; (b) "Time slice" = 1.38s.

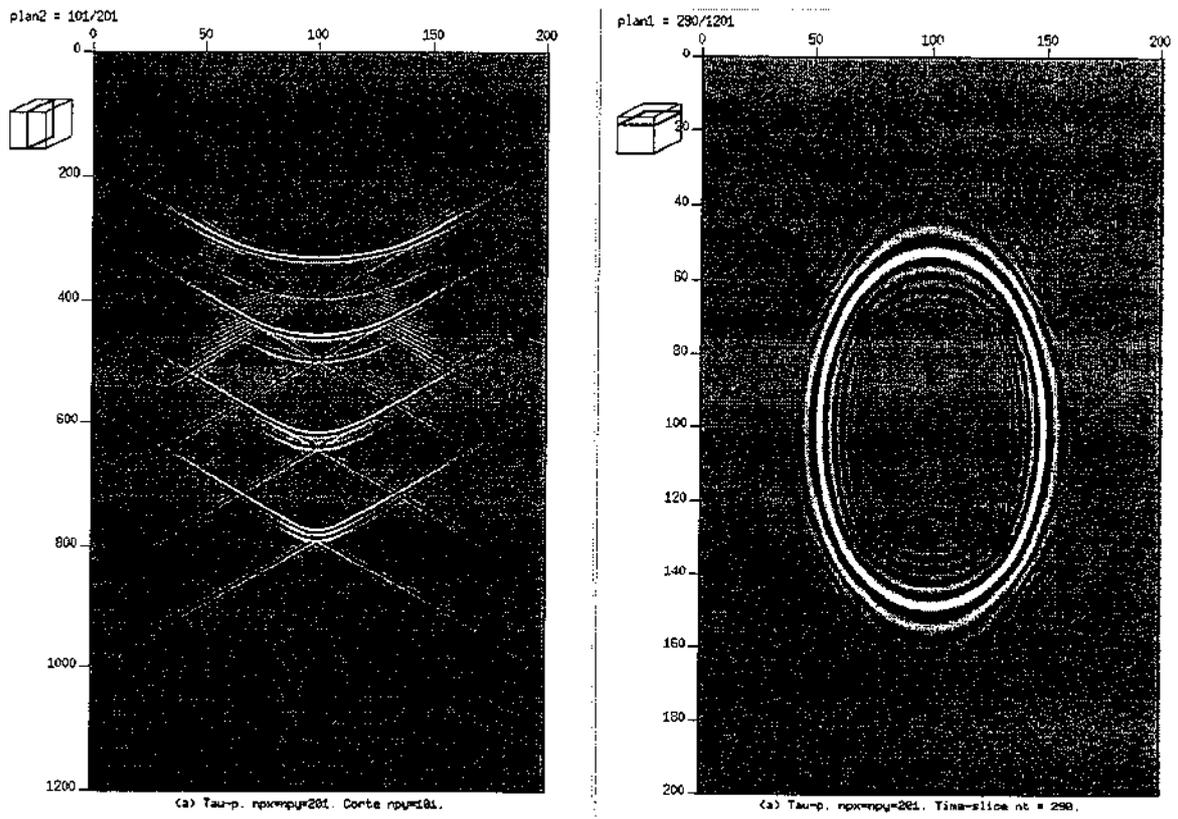


Figura 4.12: Simograma 3D no domínio $\tau - p$ (transformada direta). Dado transformado $np_x = np_y = 201$.
 (a) Seção $np_y = 101$; (b) "Time slice" = 1.16s.

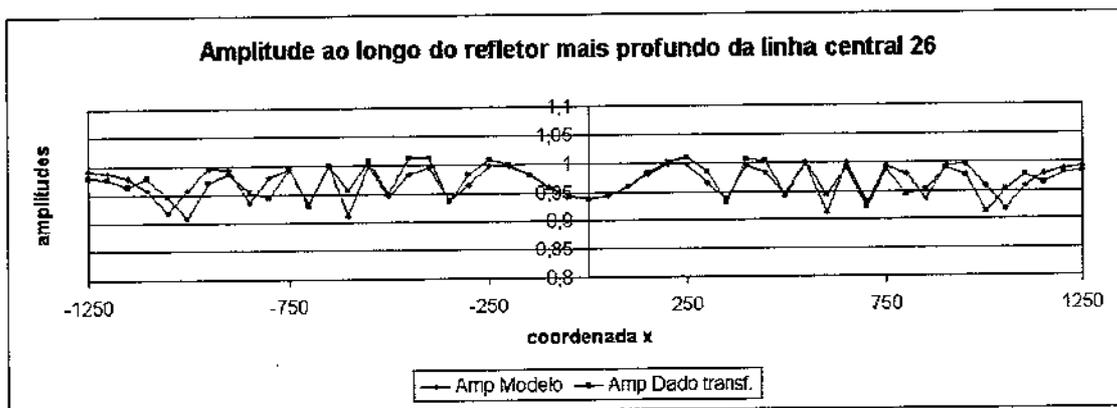


Figura 4.13: Gráfico das amplitudes ao longo do refletor mais profundo da linha central 26. A amplitude do dado reconstituído com $np_x = np_y = 201$ estão plotadas junto com as amplitudes do modelo de entrada.

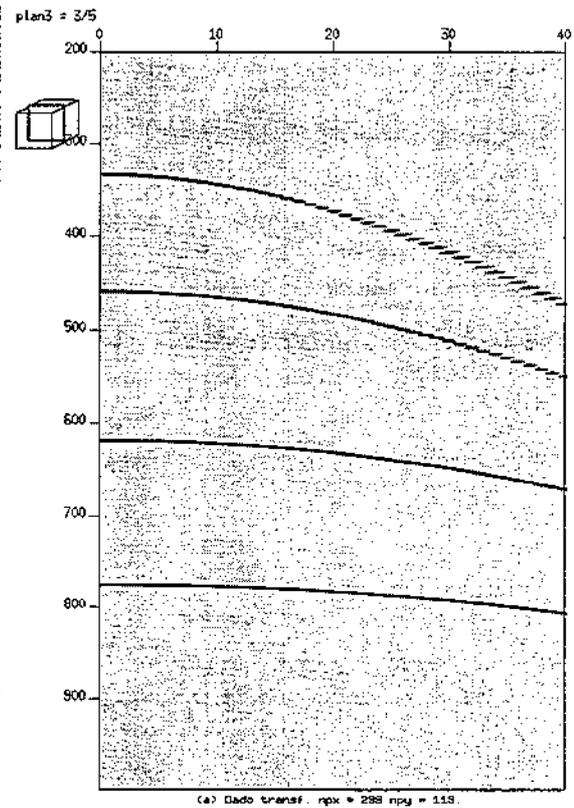
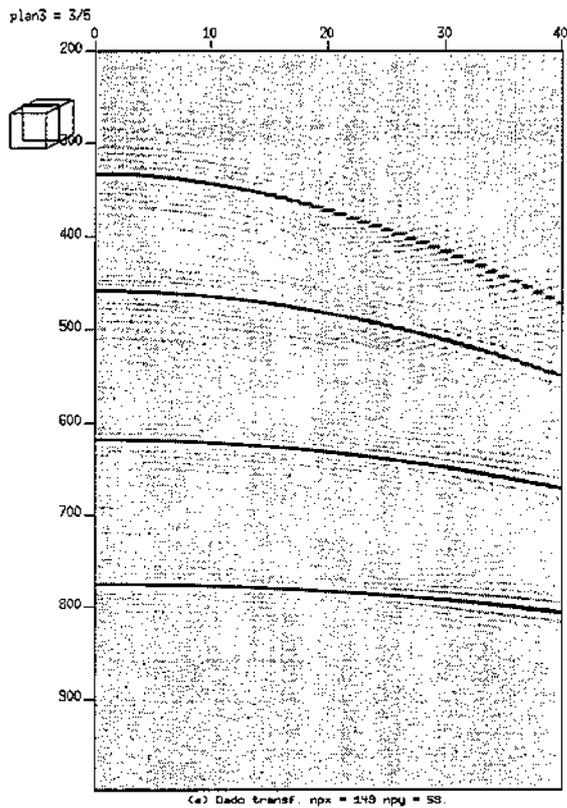


Figura 4.14: Dado reconstituído 3D com controle de falseamento. Linha central 3. Lanço "end-on" 0 a 2000m. $n_x = 41$, $\Delta x = 50\text{m}$, $n_y = 5$ e $\Delta y = 200\text{m}$. (a) $n_{p_x} = 149$ e $n_{p_y} = 59$ (b) $n_{p_x} = 299$ e $n_{p_y} = 119$.

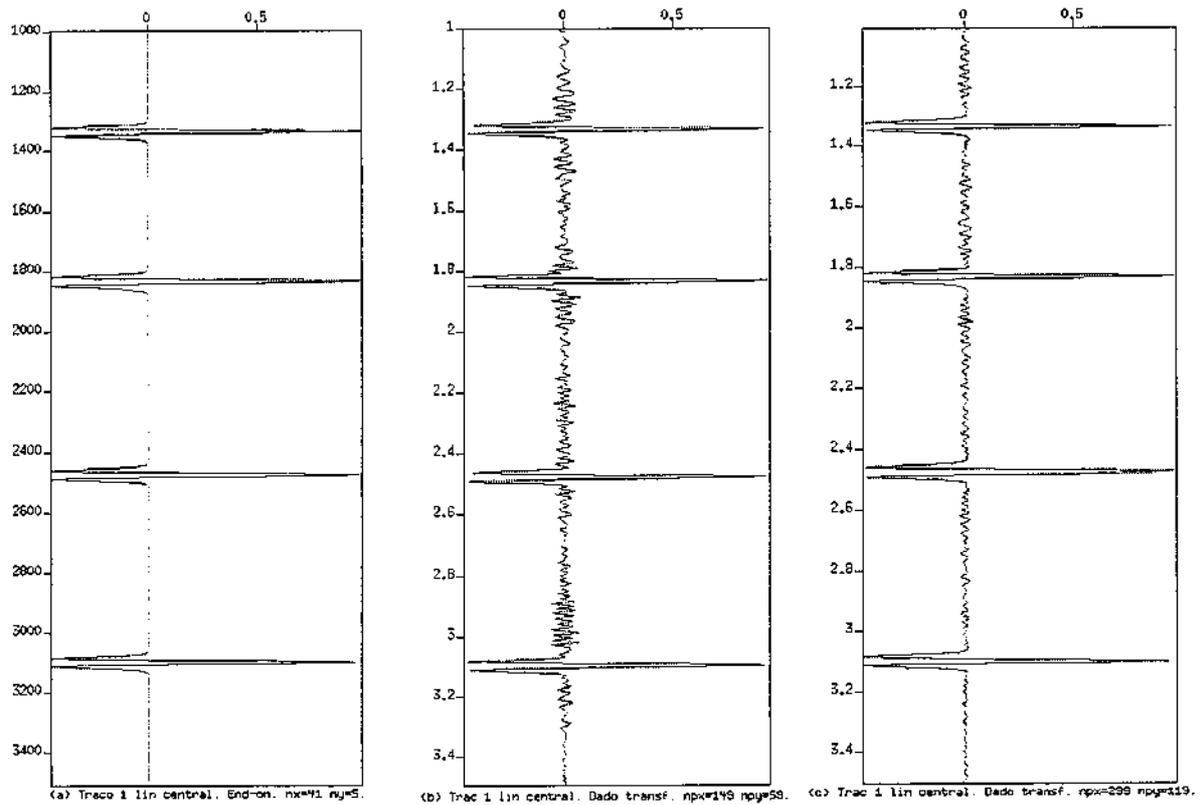


Figura 4.15: Amplitude do primeiro traço da linha central 3 (a) Modelo 3D, lanço "end-on" 0 a 2000m. $n_x = 41$, $\Delta x = 50\text{m}$, $n_y = 5$ e $\Delta y = 200\text{m}$; (b) Dado reconstituído com $n_{p_x} = 149$ e $n_{p_y} = 59$ (c) Dado reconstituído com $n_{p_x} = 299$ e $n_{p_y} = 119$.

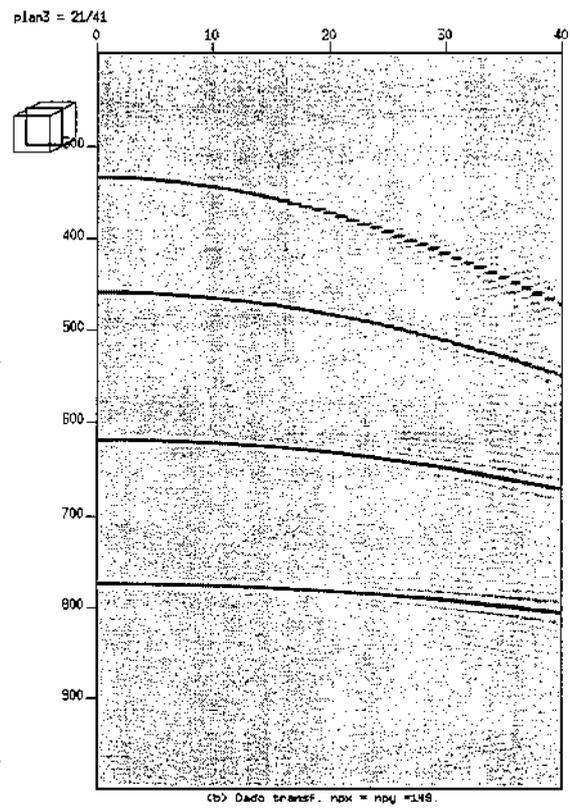
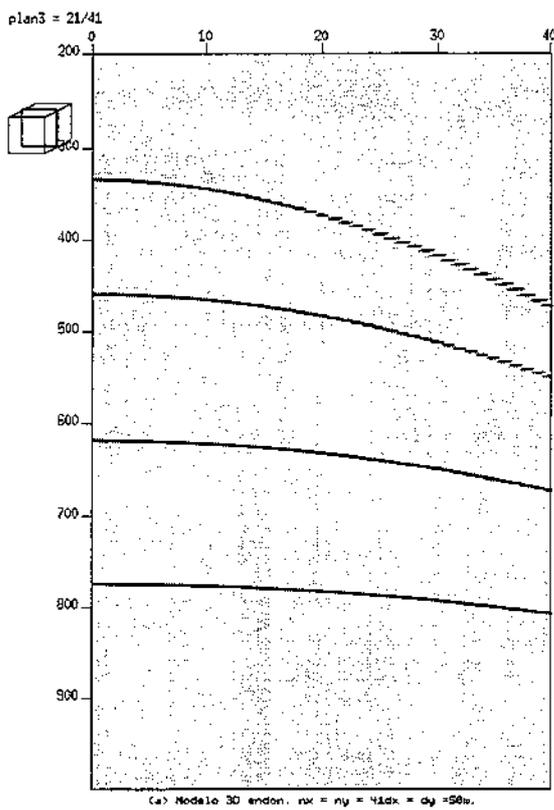


Figura 4.16: Dado reconstituído 3D com controle de falseamento. Linha central 21. Lanço "end-on" 0m a 2000m. (a) Modelo 3D $n_x = n_y = 41$, $\Delta x = \Delta y = 50$ m; b) $n_{p_x} = 149$ e $n_{p_y} = 59$.

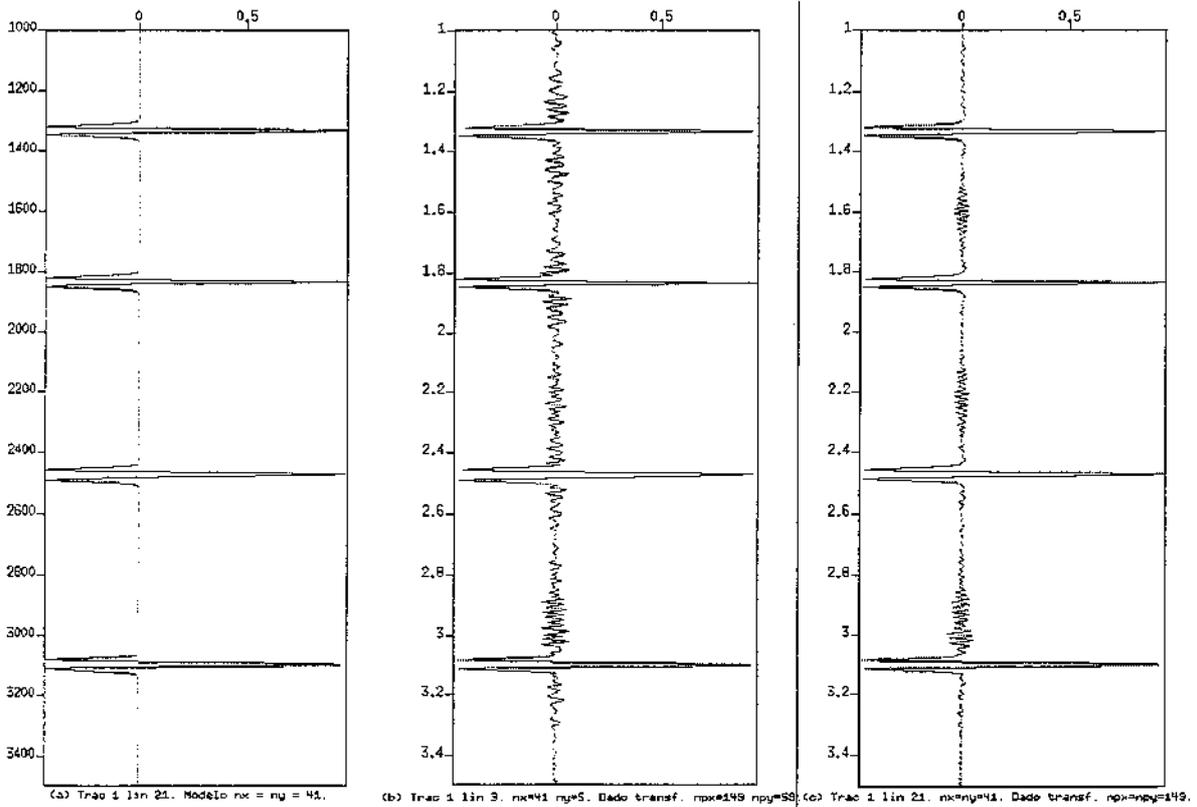


Figura 4.17: Amplitude do traço central da linha central 21. (a) Modelo 3D, lanço "end-on" 0m a 2000m. $n_x = n_y = 41$, $\Delta x = \Delta y = 50$ m, escala de tempo em ms; (b) Dado reconstituído do modelo $n_x = 41$ e $n_y = 5$ com $np_x = 149$ e $np_y = 59$; (c) Dado reconstituído do modelo $n_x = n_y = 41$ com $np_x = np_y = 201$. (b) e (c) com escala de tempo em s.

4.6 Regularização 3D

Nesta seção, o problema de regularização de um dado 3D adquirido com deriva de cabos de hidrofones é feita com auxílio da transformada $\tau - p$ 3D. A geometria de aquisição é composta por cinco linhas contendo 51 hidrofones cada, o tiro está no início da linha central. A localização dos hidrofones pode ser vista na Figura 4.18. Cada cabo possui 2500m de extensão com hidrofones a cada 50m. A separação entre os cabos é de 200m e o tiro é dado na posição (0,0). Chega-se a um desvio, no fim de cada linha, de 200m em relação ao mesmo dado adquirido de forma regular.

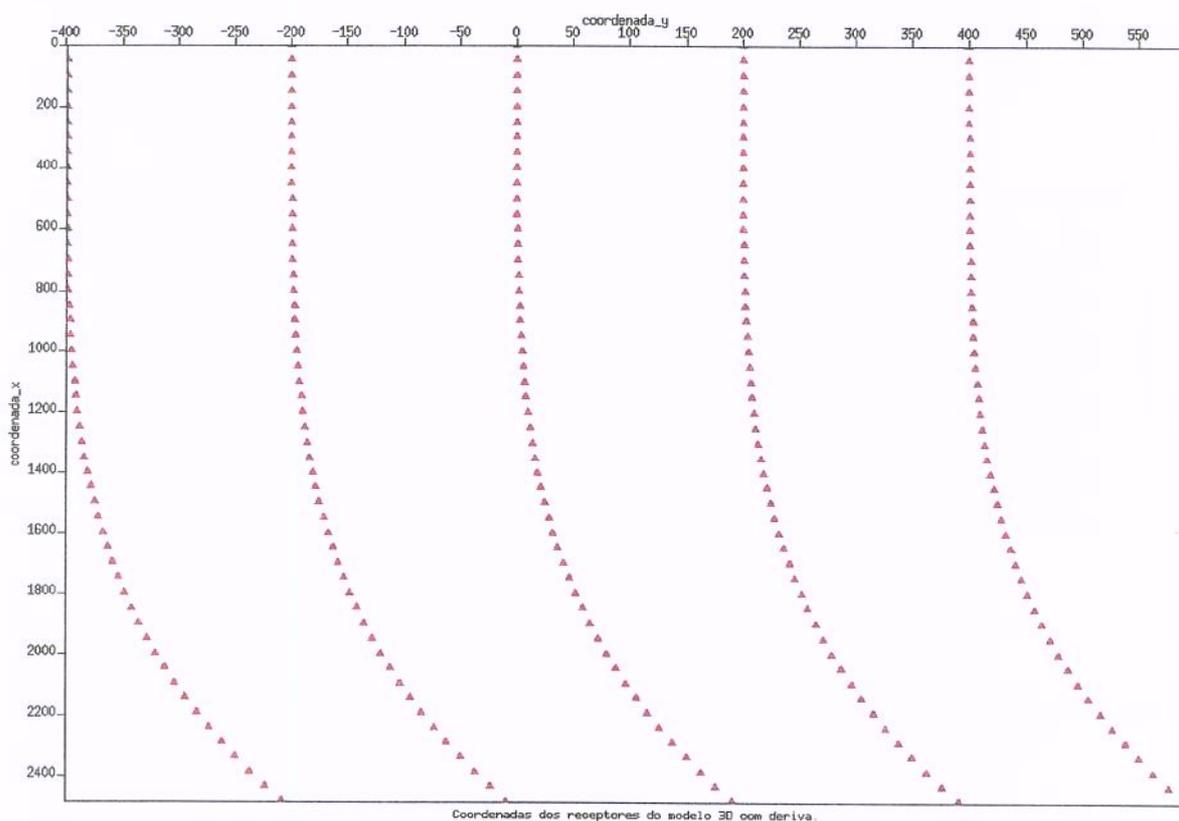


Figura 4.18: Coordenadas dos receptores do modelo com deriva. O tiro é dado na posição(0,0). O modelo possui $n_x = 51$, $\Delta x = 200\text{m}$, $n_y = 5$ $\Delta y = 200\text{m}$ e lanço do tipo "end-on" 0 a 2500m.

O dado com deriva é transformado para o domínio $\tau - p$ com os parâmetros p calculados por Nyquist. Quando a transformada inversa for realizada, as novas coordenadas dos receptores que

serão impostas são aquelas que tornem o ponto médio em subsuperfície (“commom-mid-point” – CMP) regular, ou seja, a nova geometria de receptores garantirá que o novo ponto médio esteja no centro de uma cela de uma malha regular.

Tal procedimento é um pouco diferente de impor que as coordenadas dos receptores sejam regulares. A diferença é que, atuando desta maneira, o deslocamento de um ponto em subsuperfície é o menor possível para se obter uma malha regular. Isto significa que as distorções na amplitude e na fase do sinal devido ao deslocamento também é minimizada. A Figura 4.19 mostra os deslocamentos que cada CMP sofreu de maneira que estes pontos amostrados agora estejam no centro de uma cela de uma malha regular.

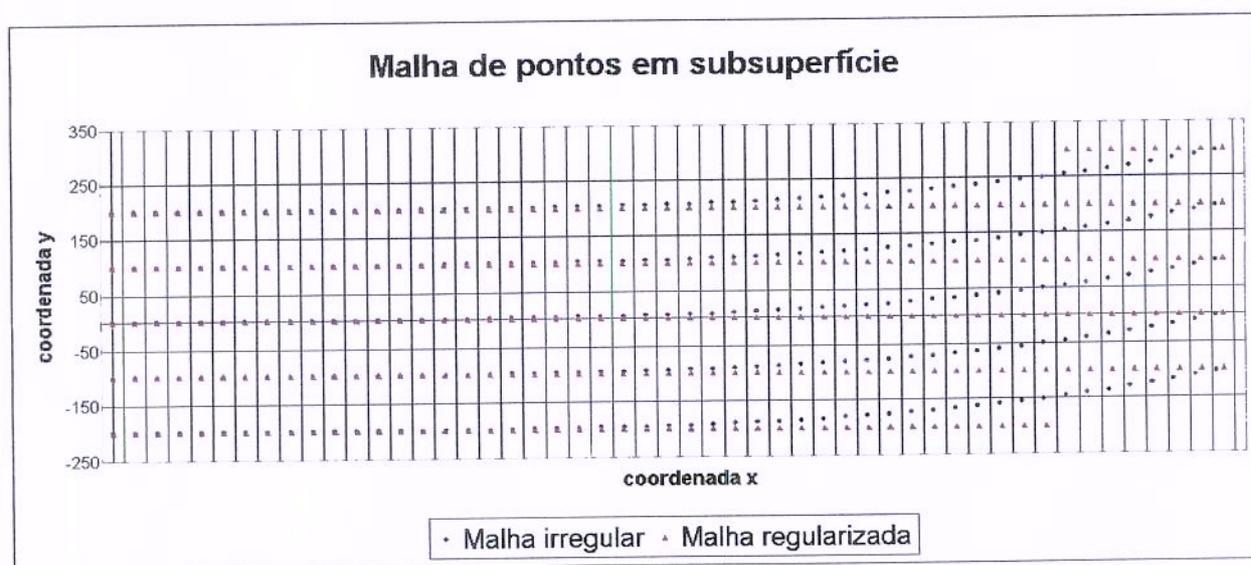


Figura 4.19: Malha regular em subsuperfície. Os receptores são deslocados de modo que a nova posição do CMP esteja no centro de uma cela.

As Figuras 4.20, 4.21 e 4.22 mostram a comparação entre as linhas centrais do dado adquirido de forma regular e do dado reconstituído com os CMPs regularizados. No detalhe do evento de reflexão relativo aos refletores mais rasos (maior mergulho) (Fig. 4.21) nota-se um estiramento do pulso do dado reconstituído e regularizado na parte onde houve o deslocamento, o que não é visto para o evento de reflexão relativo ao refletor mais profundo (Fig. 4.22).

Esse procedimento de impor que os pontos médios em subsuperfície estejam no centro de

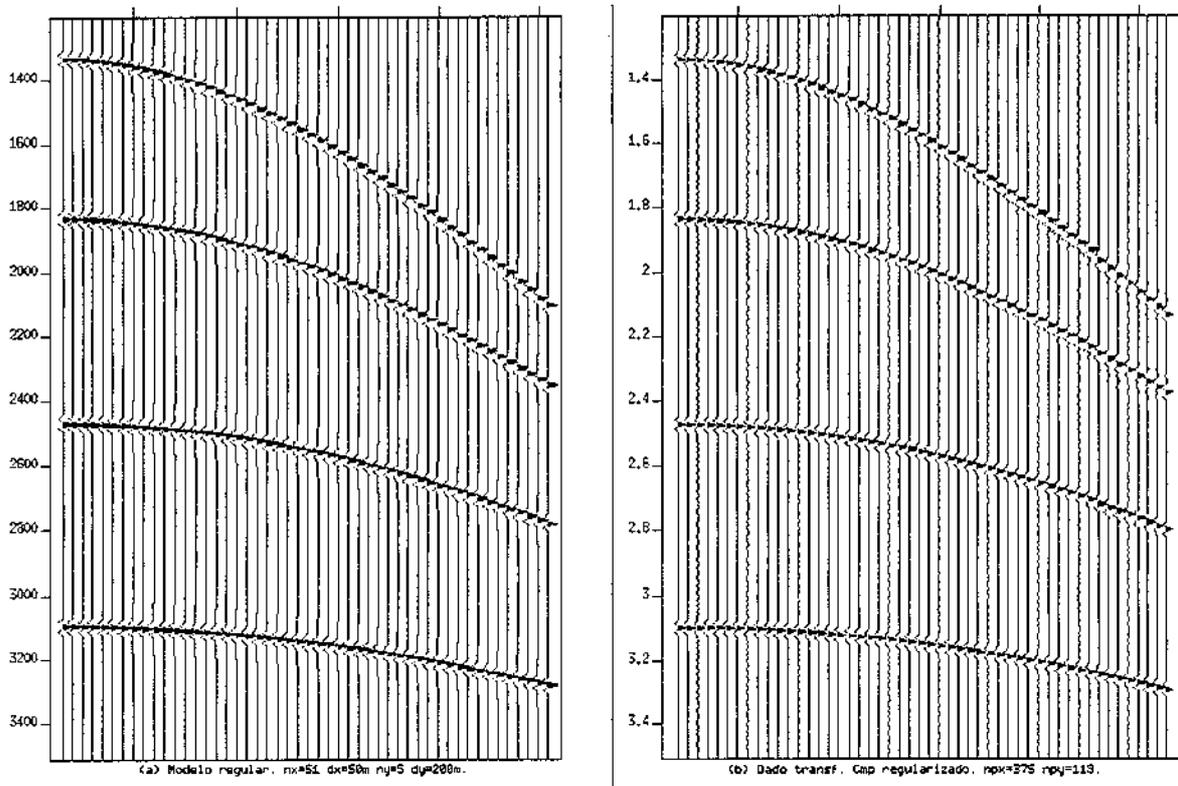


Figura 4.20: Linha central 3. (a) Modelo 3D regular $n_x = 51$, $\Delta x = 50\text{m}$, $n_y = 5$, $\Delta y = 200\text{m}$; (b) Dado reconstituído com os CMPs regularizados $n_{px} = 375$, $n_{py} = 119$.

uma malha regular com o auxílio da transformada $\tau - p$ fornece resultados promissores, mesmo para o caso estudado, de apenas cinco linhas na direção y , que está mais próximo a uma aquisição real que o modelo com simetria de parâmetros nas direções x e y . A Figura 4.23 mostra as amplitudes ao longo do refletor mais profundo do dado regularizado e do mesmo dado adquirido de forma regular.

4.7 Conclusões

A partir do estudo dos testes das transformadas $\tau - p$ 3D, chega-se a algumas conclusões referentes à parametrização nos domínios $\tau - p_x - p_y$ e $t - x - y$:

- Os valores de n_{p_x} e n_{p_y} calculados por Nyquist são necessários para reconstituir os eventos

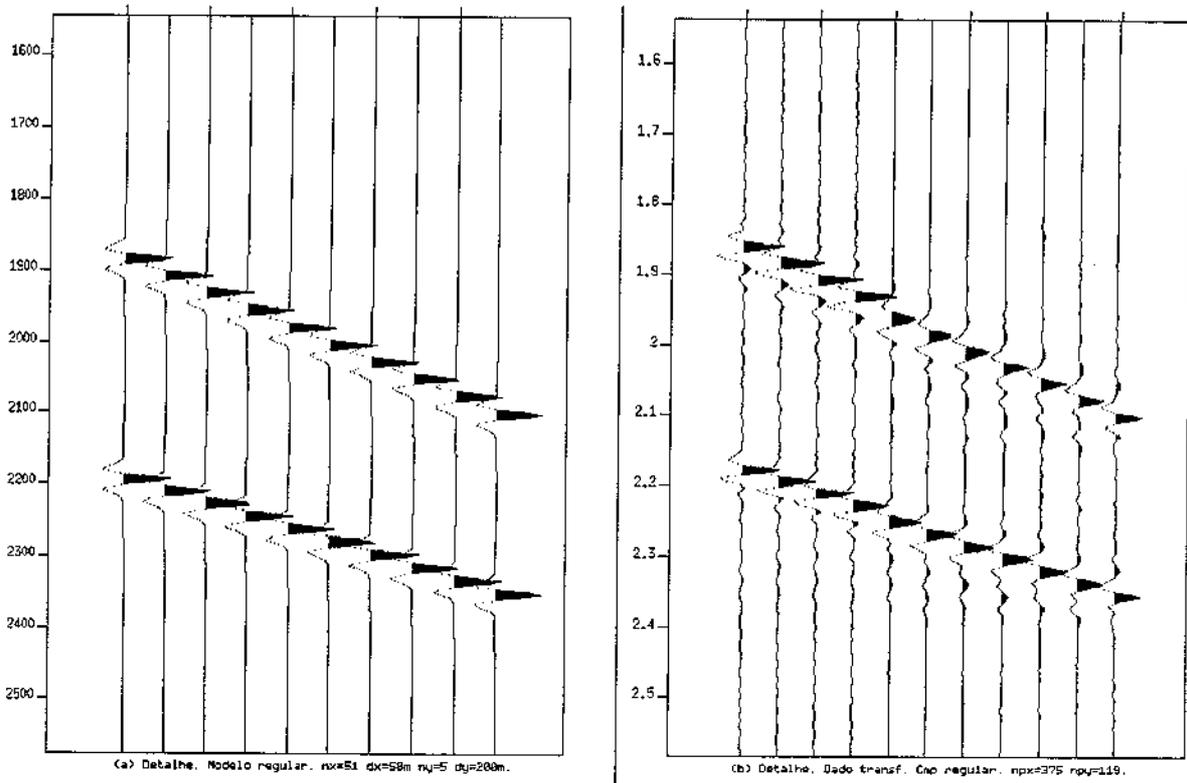


Figura 4.21: Detalhe dos dois eventos de reflexão relativos aos dois refletores mais rasos. (a) Modelo 3D regular $n_x = 51$, $\Delta x = 50m$, $n_y = 5$, $\Delta y = 200m$; (b) Dado reconstituído com os CMPs regularizados $np_x = 375$, $np_y = 119$.

de reflexão de maneira satisfatória.

- A abertura e a amostragem espacial na direção y (Y_T e Δy) ideais para que o dado reconstituído possua a menor quantidade de artefatos devem ser iguais às da direção x . Caso esta condição não seja atendida, os eventos serão reconstituídos satisfatoriamente à medida em que se aumenta os valores de np_x e np_y , porém, haverá sempre algum ruído devido à deficiência da amostragem espacial na direção y .
- A regularização do modelo 3D com deriva mostrou que, apesar de haver distorções na amplitude e forma do sinal nos traços deslocados, os resultados obtidos são promissores. Para que este tipo de regularização com auxílio da transformada $\tau - p$ se torne aplicável é preciso

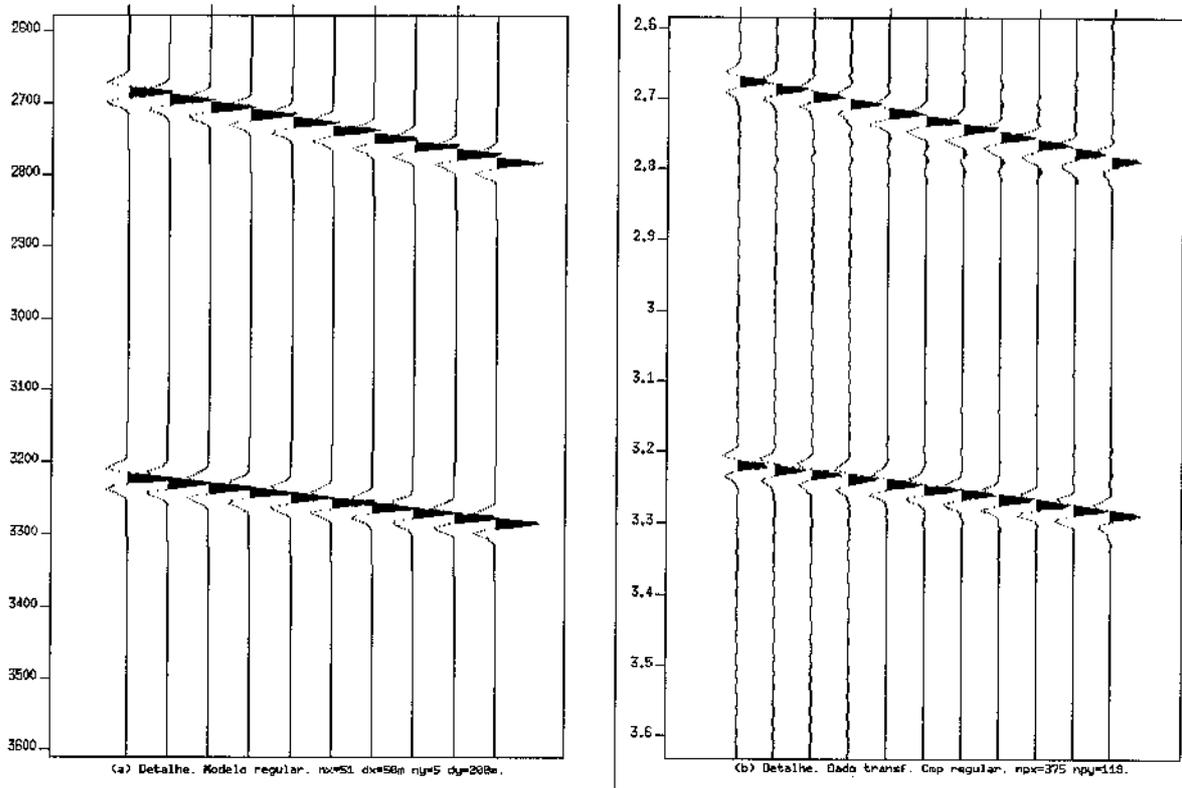


Figura 4.22: Detalhe dos dois eventos de reflexão relativos aos dois refletores mais profundos. (a) Modelo 3D regular $n_x = 51$, $\Delta x = 50\text{m}$, $n_y = 5$, $\Delta y = 200\text{m}$; (b) Dado reconstituído com os CMPs regularizados $n_{px} = 375$, $n_{py} = 119$.

estudar como minimizar os efeitos da limitação da abertura na direção y . Outra sugestão de estudo é a aplicação da correção de NMO antes da transformada direta e retirada depois da transformada inversa em dados tridimensionais.

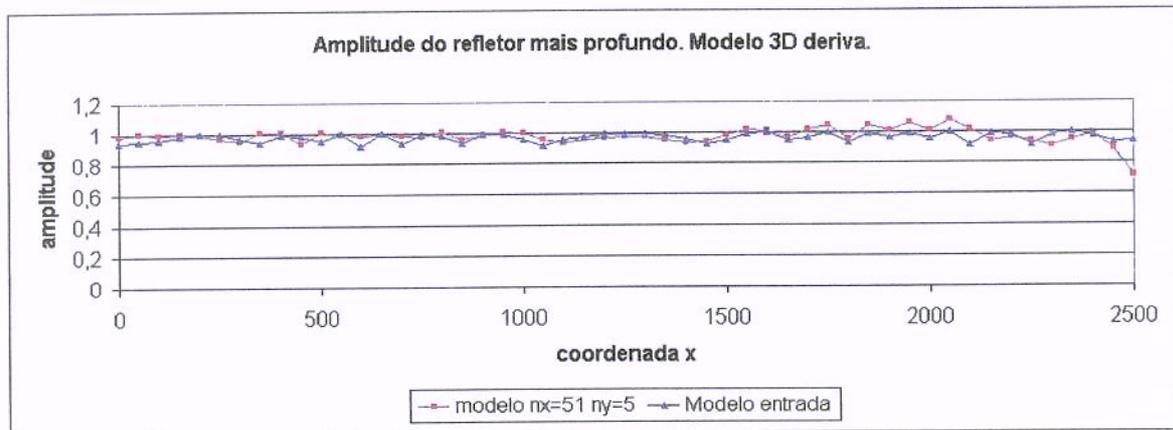


Figura 4.23: Comparação das amplitudes máximas ao longo do refletor mais profundo do modelo adquirido de forma regular e do dado reconstituído com os CMPs regularizados.

Capítulo 5

Conclusões e Sugestões

Neste capítulo, é feito um resumo das conclusões que foram obtidas com base nos testes realizados ao longo deste trabalho:

- Falseamento

Para o caso 2D, o intervalo de amostragem Δp sugerido por Turner é suficiente para reconstituir os eventos de reflexão satisfatoriamente:

$$\Delta p < \frac{1}{X_I f_{max}}.$$

Para o caso 3D, o intervalo de amostragem Δp calculado por Nyquist é necessário para reconstituir os eventos de forma satisfatória:

$$\Delta p < \frac{1}{2X_I f_{max}}.$$

Intervalos de amostragem inferiores aos valores acima sugeridos não conduzem a melhoras na reconstituição dos eventos de reflexão, mas diminuem a quantidade de artefatos deixados pela transformada. O uso de Δp pequeno, conseqüentemente aumentando o número de amostras np , impacta diretamente o tempo de computação da transformada. Portanto, deve-se considerar o tempo e os recursos computacionais disponíveis.

Especificamente para o caso 3D, a abertura e a amostragem espacial na direção y (Y_I e Δy) ideais para que o dado de saída possua a menor quantidade de artefatos devem ser iguais às

da direção x . Caso, esta condição não seja atendida, os eventos serão reconstituídos satisfatoriamente à medida em que se aumenta os valores de np_x e np_y , porém, haverá sempre algum ruído devido à deficiência da amostragem espacial na direção y .

A reconstituição é eficaz quando é utilizado o controle de falseamento do algoritmo, mesmo que o dado de entrada apresente falseamento espacial em alguns eventos. Deve-se, entretanto, ficar atento para uma adequada parametrização em p , de modo que o controle de falseamento do algoritmo possa atuar corretamente.

- Interpolação de dados

A interpolação de dados usando a transformada $\tau - p$ mostrou ser bastante eficaz, principalmente quando a correção de NMO é aplicada ao dado antes da transformada direta e retirada depois da transformada inversa.

- Regularização de dados

Para o modelo com ausência de informação em um longo trecho, o controle de falseamento usando o ponderador local fornece o melhor resultado. O controle de falseamento usando o ponderador máximo, além não reconstituir bem o dado, é mais sensível a erros de velocidade.

No caso do modelo com o intervalo de amostragem espacial irregular 2D, o controle de falseamento que utiliza o ponderador máximo oferece o melhor resultado, pois reconstitui satisfatoriamente os eventos e deixa menos artefatos no dado.

A regularização do dado 3D, feita com base na imposição de uma nova geometria, de modo que o ponto médio amostrado caia no centro de uma cela em subsuperfície, mostrou resultados promissores, mesmo quando a amostragem na direção y não é a ideal (teste com cinco linhas na direção y). Uma sugestão para regularizar o dado tridimensional com auxílio da transformada $\tau - p$ é aplicar a correção de NMO antes da transformada direta e retirá-la após a transformada inversa. O controle de falseamento, o ponderador e o cálculo de uma distância média entre traços areal também podem ser objetos de uma futura investigação.

Referências Bibliográficas

- Bessonova, E. N., Fishman, V. M., Ryaboyi, V. Z., Sitnikova, G. A. The tau method for inversion of travel times – I. deep seismic sounding data. *Geophys. J. R. astr. Soc.*, v. 36, p. 377–398, 1974.
- Chapman, C. H. A new method for computing synthetic seismograms. *Geophys. J. R. astr. Soc.*, v. 54, p. 481–518, 1978.
- Chapman, C. H. Generalized Radon transforms and slant stacks. *Geophys. J. R. astr. Soc.*, v. 66, p. 445–453, 1981.
- Claerbout, J. F. Slant frames. *Report of Stanford Exploration Project*, v. 1, p. 279–282, 1974.
- Claerbout, J. F. *Imaging the Earth's interior*. Oxford, London: Blackwell Scientific Publications, 1985. Cap. 5: Some Frontiers, p. 315–326.
- Diebold, J. B. & Stoffa, P. L. The travelttime equation, tau-p mapping, and inversion of common midpoint data. *Geophysics*, v. 46, n. 3, p. 238–254, march 1981.
- Durrani, T. S. & Bisset, D. The Radon transform and its properties. *Geophysics*, v. 49, n. 8, p. 1180–1187, august 1984.
- Harding, A. J. Slowness–time mapping of near offset seismic reflection data. *Geophys. J. R. astr. Soc.*, v. 80, p. 463–492, 1985.

- Kappus, M. E., Harding, A. J., Orcutt, J. A. A comparison of tau-p transform methods. *Geophysics*, v. 55, n. 9, p. 1202–1215, september 1990.
- Mithal, R. & Vera, E. E. Comparison of plane-wave decomposition and slant stacking of point-source seismic data. *Geophysics*, v. 52, n. 12, p. 1631–1638, december 1987.
- Stoffa, P. L. Tau-p: A plane wave approach to the Analysis of Seismic Data. The Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1989. Introduction.
- Trad, D., Ulrych, T., Sacchi, M. Accurate interpolation with high-resolution time-variant Radon transforms. *Geophysics*, v. 67, n. 2, p. 644–656, april 2002.
- Trad, D., Ulrych, T., Sacchi, M. Latest views of the sparse Radon transform. *Geophysics*, v. 68, n. 1, p. 386–399, february 2003.
- Treitel, S., Gutowski, P. R. & Wagner, D. E. Plane-Wave decomposition of seismograms. *Geophysics*, v. 47, n. 10, p. 1375–1401, october 1982.
- Turner, G. Aliasing in the $\tau - p$ transform and the removal of spatially aliased coherent noise. *Geophysics*, v. 55, n. 11, p. 1496–1503, november 1990.
- Wang, Y. & Houseman, G. A. Point-source tau-p transform: A review and comparison of computational methods. *Geophysics*, v. 62, n. 1, p. 325–334, january 1997.
- Yilmaz, O. Seismic Data Processing. Tulsa, OK: Society of Exploration Geophysicists, 1987. Cap. 7: Slant stack and applications, p. 428–453.

Apêndice A

Propriedade do deslocamento em tempo da Transformada de Fourier

Transformada de Fourier:

$$\hat{f}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-i\omega t} dt.$$

Transformada de Fourier – Propriedade do Deslocamento:

$$g(t) = f(t + \Delta\tau) \implies \hat{g}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} g(t)e^{-i\omega t} dt = \int_{-\infty}^{\infty} f(t + \Delta\tau)e^{-i\omega t} dt.$$

Fazendo uma mudança de variável, $t' = t + \Delta\tau \implies \begin{cases} t = t' - \Delta\tau \\ dt = dt' \end{cases}$

Tem-se,

$$\hat{g}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t')e^{-i\omega(t' - \Delta\tau)} dt' = e^{-i\omega\Delta\tau} \int_{-\infty}^{\infty} f(t')e^{-i\omega t'} dt' = e^{-i\omega\Delta\tau} \hat{f}(\omega).$$

O deslocamento no domínio do tempo ($\Delta\tau$) corresponde a uma multiplicação pela fase ($e^{-i\omega\Delta\tau}$) no domínio da frequência.