



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

Dione Cherpinsky Moraes\*, PETROBRAS S/A, Rodrigo de Souza Portugal, UNICAMP e Carlos Alves da Cunha Filho, PETROBRAS S/A

Copyright 2005, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation at the 9<sup>th</sup> International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Salvador, Brazil, 11-14 September 2005.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 9<sup>th</sup> International Congress of the Brazilian Geophysical Society. Ideas and concepts of the text are authors' responsibility and do not necessarily represent any position of the SBGf, its officers or members. Electronic reproduction or storage of any part of this paper for commercial purposes without the written consent of the Brazilian Geophysical Society is prohibited.

### Abstract

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 constraints during seismic acquisition. A very important non-cultural irregularity which occurs during marine seismic surveys is hydrophone cable drift caused by ocean currents (cable feathering).

These irregularities must 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.

### Introdução

A transformada  $\tau$ - $p$  é uma operação que mapeia uma reta no domínio  $t$ - $x$ , em um ponto no domínio  $\tau$ - $p$ . O coeficiente angular da reta define o valor de  $p$ ,  $\tau$  é definido pelo coeficiente linear ou interseção.

Chapman (1981) propôs a seguinte equação para o caso 2D:

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

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

A transformada inversa pode ser dada por (Claerbout, 1985):

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

onde  $\rho(t)$  é a transformada inversa de Fourier da função  $|\omega|/2\pi$ , chamada de filtro rho ou filtro rampa. A aplicação do filtro rho assegura que amplitude e fase do sinal sejam reconstituídas perfeitamente.

Para o caso 3D, a transformada  $\tau$ - $p$  mapeia um plano no domínio  $t$ - $x$ - $y$  em um ponto no domínio  $\tau$ - $p_x$ - $p_y$ . A transformada direta passa a ser:

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

onde  $p_x$  e  $p_y$  são as inclinações do plano em relação aos eixos  $x$  e  $y$ , respectivamente.

Similarmente, para a transformada inversa 3D:

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

onde  $\rho_{3D}(t)$  é a transformada inversa de Fourier da função  $(\omega/2\pi)^2$ .

Neste processo, criam-se alguns artefatos no dado reconstituído, isto é, quando é feita a transformação inversa, voltando para o domínio  $t$ - $x$ . Tais artefatos decorrem da discretização e das limitações impostas pelo aparato de aquisição do dado, como comprimento do lançamento e distância entre receptores, que causam efeitos de borda e falseamento, respectivamente. Com a evolução dos equipamentos de aquisição, em levantamentos convencionais, os lançamentos são superiores a três quilômetros e distância entre receptores menores que 25m, tais efeitos estão sendo atenuados.

Nas aplicações aqui estudadas, a transformada  $\tau$ - $p$  é implementada utilizando o empilhamento oblíquo ("slant-stack"), para tal soma-se o dado sísmico no domínio do afastamento ao longo de uma reta de inclinação  $p$ . Primeiramente cada traço de entrada sofre um deslocamento em tempo constante, que depende de  $p$  e da posição do traço, ( $\Delta\tau = px$ ). Em seguida, somam-se esses traços deslocados para produzir um único traço de saída, correspondente àquela inclinação  $p$ . O algoritmo desenvolvido realiza o empilhamento oblíquo no domínio da frequência, onde o deslocamento no tempo  $\Delta\tau$  equivale à multiplicação pela fase  $e^{-i\omega\Delta\tau}$ . A escolha dos parâmetros  $p$ , principalmente o incremento  $\Delta p$  é fundamental para minimizar o surgimento de novos artefatos no dado reconstituído.

Este trabalho desenvolve os algoritmos que realizam as transformadas  $\tau$ - $p$  2D e 3D e sugere ponderadores e controles de falseamento para interpolar e regularizar dados sísmicos bidimensionais e tridimensionais com auxílio dessas transformadas. Também estuda a discretização ideal de  $p$ , de modo a corretamente amostrar o dado no domínio  $\tau$ - $p$ , assegurando sua boa reconstituição em  $t$ - $x$ .

A amplitude e fase do sinal reconstituído são mantidas, porém este trabalho 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.

**Controle de Falseamento**

Controles de falseamento espacial foram implementados nos algoritmos das transformadas  $\tau$ - $p$  direta e inversa. A frequência de Nyquist é função de  $p$ , sendo diferente para cada reta sobre a qual o empilhamento oblíquo está sendo calculado:

$$T. Direta: f_{NYQ} = \frac{1}{2p\Delta x} \tag{1}$$

$$T. Inversa: f_{NYQ} = \frac{1}{2x\Delta p} \tag{2}$$

Isolando  $\Delta p$  em (2) e tornando  $x$  igual ao lanço de aquisição  $X_i$ , chega-se ao critério de Nyquist, serão testados mais dois critérios para o cálculo do incremento  $\Delta p$ :

Nyquist:	Turner (1990):	Yilmaz (1987):
$\Delta p = \frac{1}{2X_i f_{max}}$	$\Delta p < \frac{1}{X_i f_{max}}$	$np \approx nx$ $\Delta p = \frac{P_{max} - P_{min}}{np}$

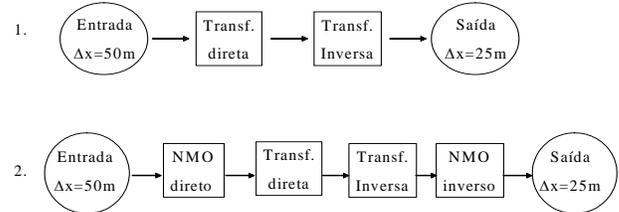
onde,  $X_i$  é a faixa dos valores de  $x$ .

O sismograma sintético para estes testes é proveniente de um modelo de camadas planas horizontais com velocidades constantes e possui 161 traços ( $nx$ ) espaçados de 25 m e lanço 2000-0-2000 m.

A Figura 1 mostra os dados reconstituídos com quatro diferentes valores para  $\Delta p$  – os sugeridos por Yilmaz (1987) e Turner (1990), o que atinge a frequência de Nyquist e mais que o dobro de Nyquist. Nota-se que a sugestão de Yilmaz, além de não reconstituir bem os eventos (presença de estiramento na parte dos eventos de reflexão onde há as maiores inclinações), possui a maior quantidade de artefatos. Todos os eventos estão bem reconstituídos quando se utiliza o critério de Turner.. Nyquist reconstitui perfeitamente os eventos, sua utilização dependerá do tempo e dos recursos computacionais disponíveis, uma vez que  $\Delta p$  impacta diretamente no tempo da transformada.

**Interpolação de dados**

No domínio  $\tau$ - $p$ ,  $x$  define a inclinação da reta sobre a qual é realizado o empilhamento oblíquo. Definir um novo intervalo  $\Delta x$  para o dado, significa que, no domínio  $\tau$ - $p$ , este dado será somado ao longo de mais retas cujas inclinações são dadas pelos novos valores de  $x$ . Foram realizados dois testes:



Os resultados dos testes podem ser vistos na Figura 2. A Figura 2a mostra o modelo de entrada, observar o falseamento iniciando nos afastamentos de 750m nos dois eventos mais rasos. A figura 2b mostra o dado reconstituído e interpolado sem aplicação prévia da correção de NMO. Apesar da má reconstituição e interpolação da parte dos eventos onde há as maiores inclinações (afastamentos longos nos dois eventos mais rasos), nota-se que o falseamento está iniciando em afastamentos superiores a 1000m e os dois eventos mais profundos estão bem reconstituídos e sem falseamento. Tal constatação levou a aplicação da correção de NMO antes da transformada  $\tau$ - $p$  direta, retirando-a após a transformada inversa (Fig 2c). Ressalta-se aqui que a velocidade usada foi a velocidade do modelo, porém esta não é uma condição necessária, pois o objetivo da correção de NMO é apenas de suavizar as maiores inclinações dos eventos para que o dado possa ser corretamente interpolado, o que pode ser constatado na reconstituição do evento mais profundo sem aplicar o NMO (Fig. 2b).

**Regularização de dados**

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 velocidades e migração, melhoram seu desempenho se os dados de entrada estiverem distribuídos de maneira regular na linha sísmica, seja 2D ou 3D.

Para o caso 2D, foram simulados dois tipos de irregularidades: obstáculos operacionais (longo trecho sem informação sísmica) e deriva de cabos de hidrofones. Para se obter uma regularização de dados satisfatória é necessária a aplicação de NMO antes da transformada  $\tau$ - $p$  direta e retirada após a transformada inversa, desse modo, pode-se atuar com um controle de falseamento mais rigoroso.

Foram implementados ponderadores para cada traço que reflete a irregularidade ao longo dos afastamentos e mudanças no controle de falseamento, tornando-o mais rigoroso, para que atue mais nos efeitos de borda do intervalo sem informação e acentue o preenchimento deste trecho por retas horizontais, propiciando o uso da correção NMO antes da transformada. Foram testados dois controles de falseamento, ambos mais rigorosos do que o descrito na equação (1):

Ponderador:  $\omega_i = \frac{x_{i+1} - x_{i-1}}{2\Delta x}$ , onde  $x_i$  é o afastamento de cada traço.

Controle falseamento ponderador local, variável para cada traço e para cada reta:

$$f_{NYQ}[i, p] = \frac{1}{2p\omega_i\Delta x}. \quad (3)$$

Controle falseamento ponderador máximo, variável para cada reta:  $f_{NYQ}[i, p] = \frac{1}{2p\omega_{\max}\Delta x}$ . (4)

A Figura 3 mostra o sismograma do obstáculo operacional reconstituído com o controle de falseamento original (Eq. 01), o controle com o ponderador local (Eq. 03) e com o ponderador máximo (Eq. 04), todos com o NMO antes da transformada  $\tau$ - $p$ . O melhor resultado foi obtido com o controle de falseamento usando o ponderador local, pois há menos distorções na amplitude e na forma do traço central do trecho sem informação.

A Figura 4 mostra o mesmo teste para a reconstituição do sismograma que simula a deriva de cabo 2D. No modelo de entrada há pequenas irregularidades, onde o intervalo entre estações de receptores é irregular, de aproximadamente 25m. Nas reconstituições da figura 4, todos os sismogramas possuem intervalo entre estações de receptores de 25m. Os eventos de reflexão com os três diferentes controles de falseamento estão bem reconstituídos, no entanto, o sismograma com menos artefatos foi aquele reconstituído com o controle que usa o ponderador máximo.

Para o caso 3D, aplicou-se o par de transformadas  $\tau$ - $p$  para regularizar um dado cuja geometria de aquisição é vista na figura 5. A geometria 3D é composta de 5 linhas de receptores com distância entre elas de 200m, com 51 receptores em cada linha, distante um do outro de 50m. O tiro é dado no primeiro receptor da linha central. Nota-se na Figura 5 que as linhas de receptores estão desviadas, simulando uma deriva de cabos de hidrofones ocasionadas por correntes oceânicas.

Para regularizar este sismograma de tiro comum 3D, o dado foi transformado para o domínio  $\tau$ - $p$  com  $\Delta p$  calculado pelo critério de Nyquist. Na transformada inversa, uma nova geometria para os receptores foi

imposta de modo que o novo CMP ("common mid point") esteja no centro de uma cela de uma malha regular.

O resultado da imposição dessa nova geometria com a utilização da transformada  $\tau$ - $p$  3D é visto na Figura 6. O dado reconstituído e regularizado (direita) é comparado com um sismograma 3D regular (sismograma da linha central), isto é, sem deriva de cabos. Nota-se que na parte de maior inclinação nos dois eventos mais rasos ocorre estiramento do traço, o que não ocorre no evento mais profundo. A sugestão é usar a correção de NMO antes da transformada  $\tau$ - $p$  direta.

## Conclusões

Um resumo das conclusões:

- O critério de Turner para o cálculo de  $\Delta p$  é suficiente para uma boa reconstituição dos eventos de reflexão.
- Interpolador dado sísmico com auxílio da transformada  $\tau$ - $p$  é eficaz quando se utiliza a correção de NMO antes da transformada.
- Regularizar dado 2D com correção de NMO antes da transformada:
- longo trecho sem informação sísmica: o controle de falseamento com o ponderador local forneceu os melhores resultados,
- receptores distribuídos de maneira irregular: melhor resultado obtido com o controle de falseamento com o ponderador máximo.
- Regularizar dado 3D com auxílio da transformada  $\tau$ - $p$  apresentou resultados animadores, mesmo com apenas 5 amostras na direção  $y$ . A sugestão aqui é aplicar a correção de NMO antes da transformada  $\tau$ - $p$ .

## Agradecimentos

Os autores agradecem a Raimundo Freire pela discussão teórica e revisão e à Petrobras pela permissão de publicar este trabalho.

## Referências

- Chapman, C. H. Generalized Radon transforms and slant stacks. *Geophys. J. R. Astr. Soc.*, v. 66, p. 445–453, 1981.
- Claerbout, J. F. *Imaging the Earth's interior*. Oxford, London: Blackwell Scientific Publications, 1985. Cap. 5: Some Frontiers, p. 315–326.
- 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.
- Yilmaz, O. *Seismic Data Processing*. Tulsa, OK: Society of Exploration Geophysicists, 1987. Cap. 7: Slant stack and applications, p. 428–453.

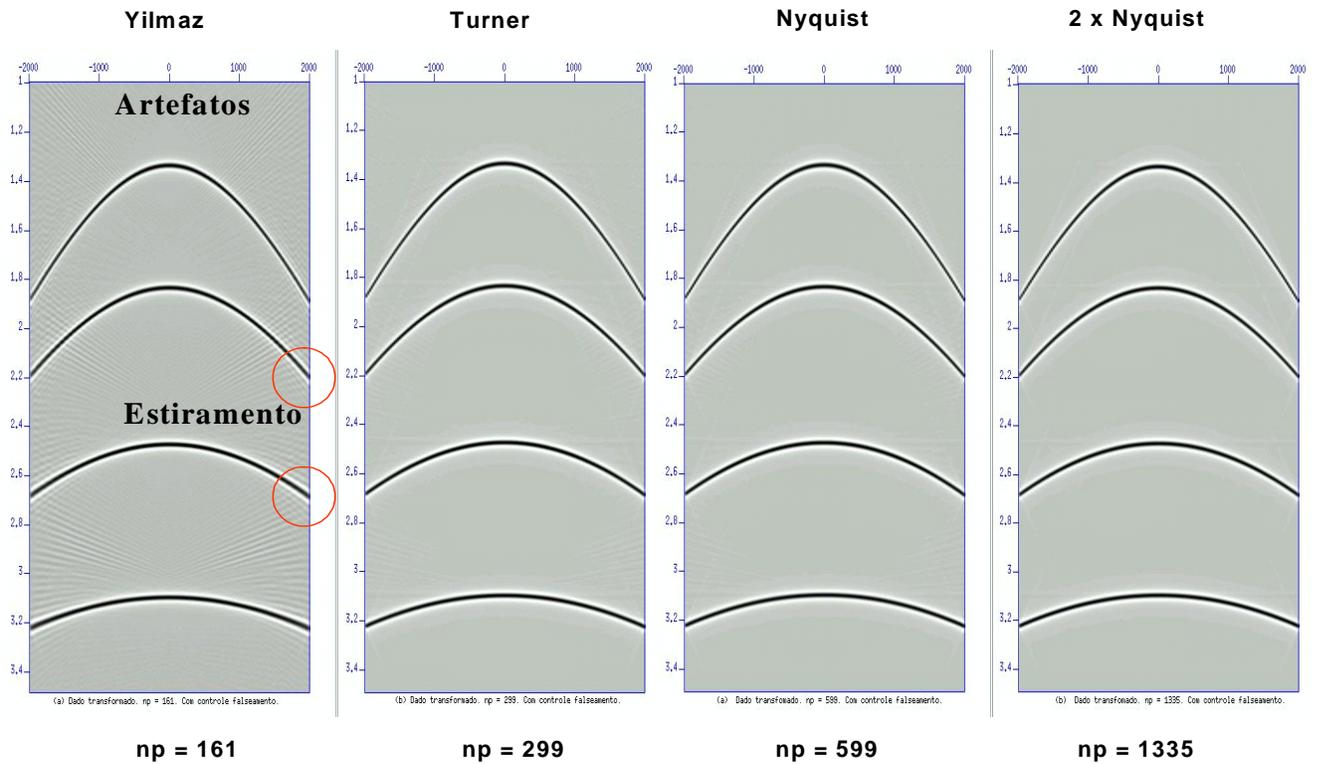


Fig. 01 – Sismogramas reconstituídos com diferentes valores de p.

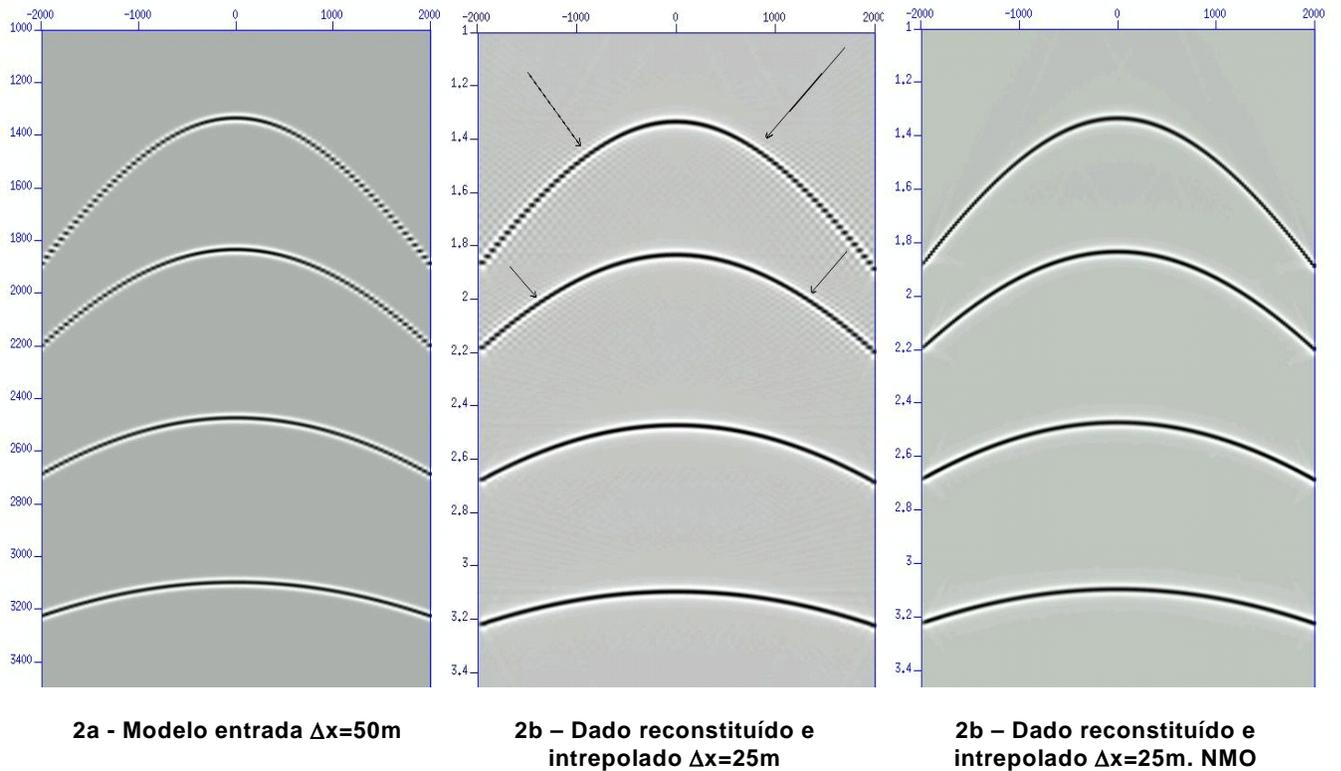
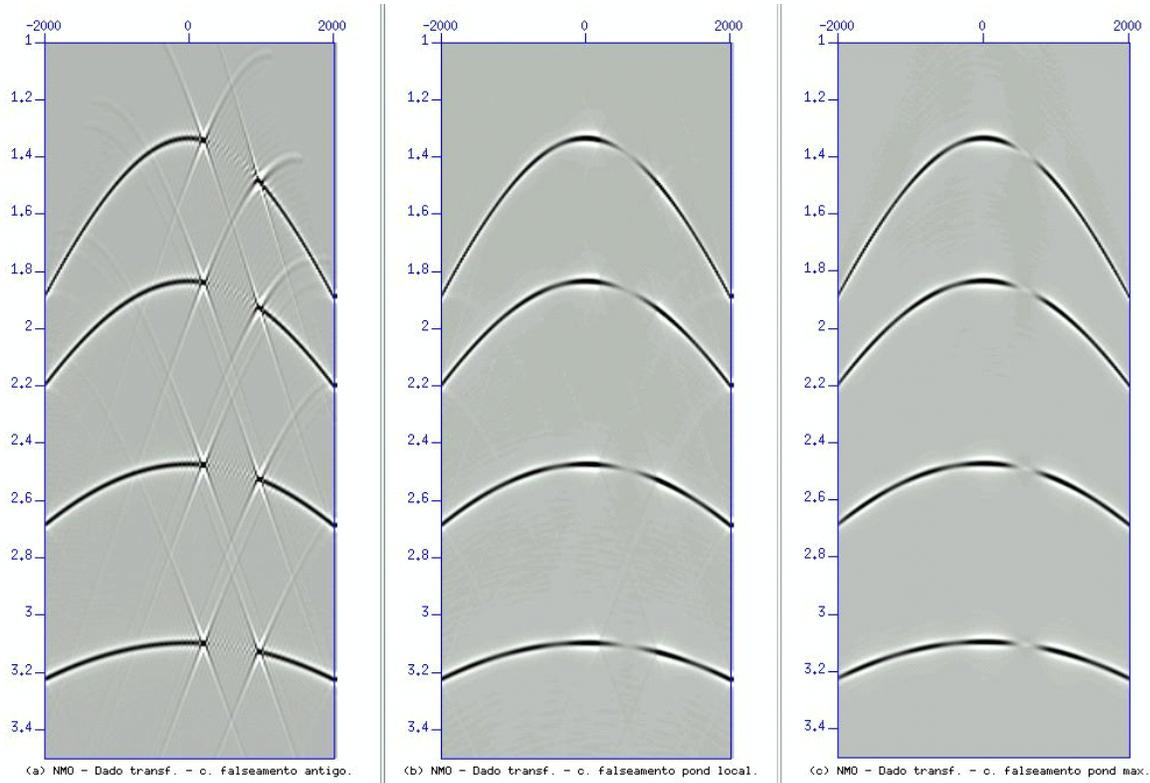


Figura 02 – Interpolação de dado 2D. Em 2b, aplicação de NMO antes da transformada direta e retirada após a inversa.



**Controle original - NMO**

**Pond. Local - NMO**

**Pond. Máximo - NMO**

Figura 03 – Regularização 2D. Sismograma de entrada simula obstáculo operacional, ausência de 30 traços.

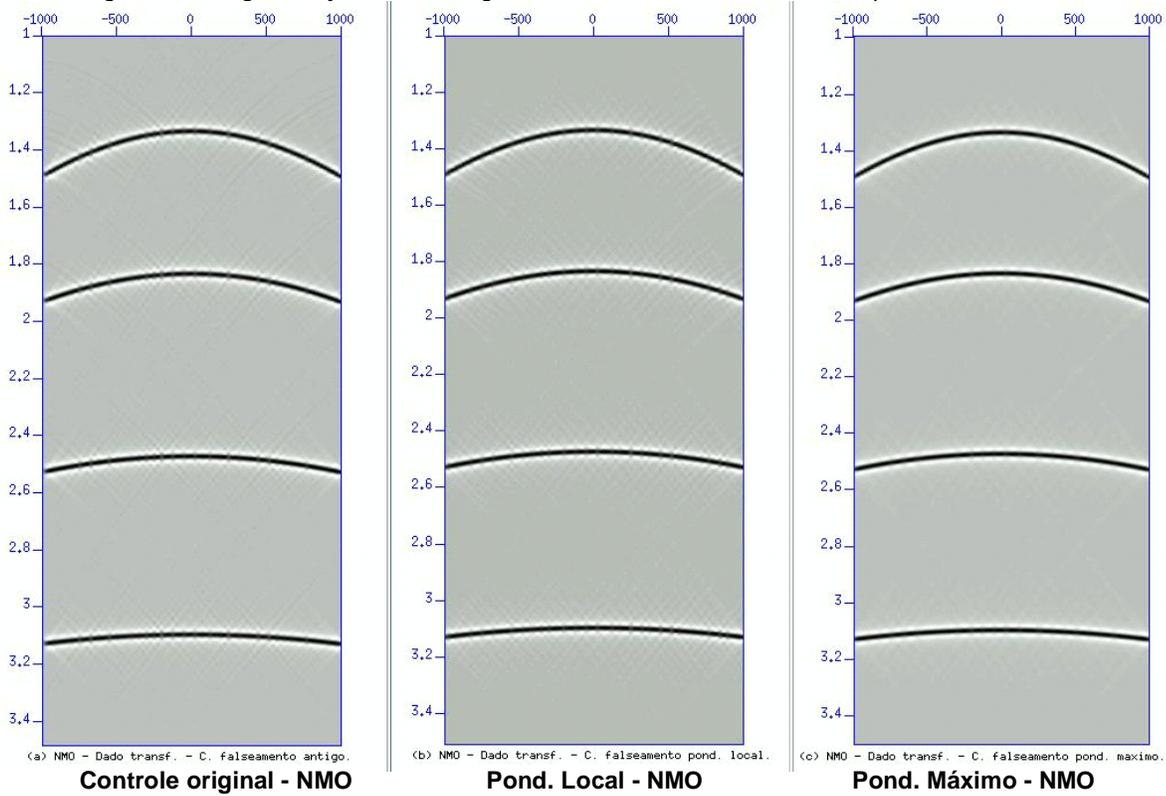
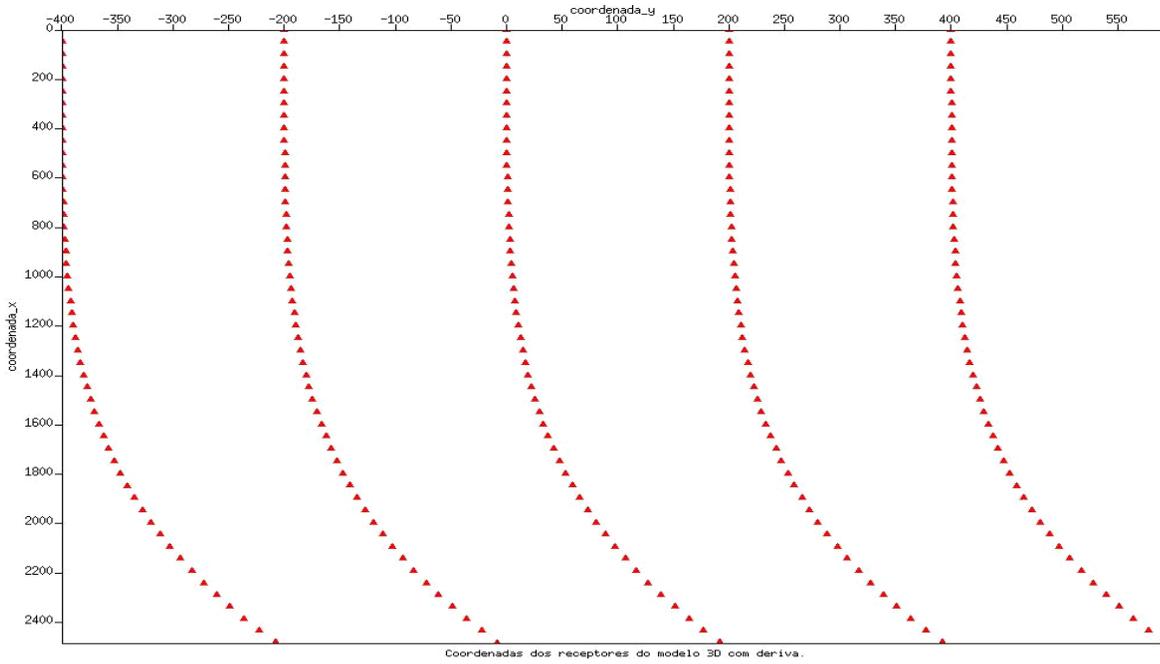
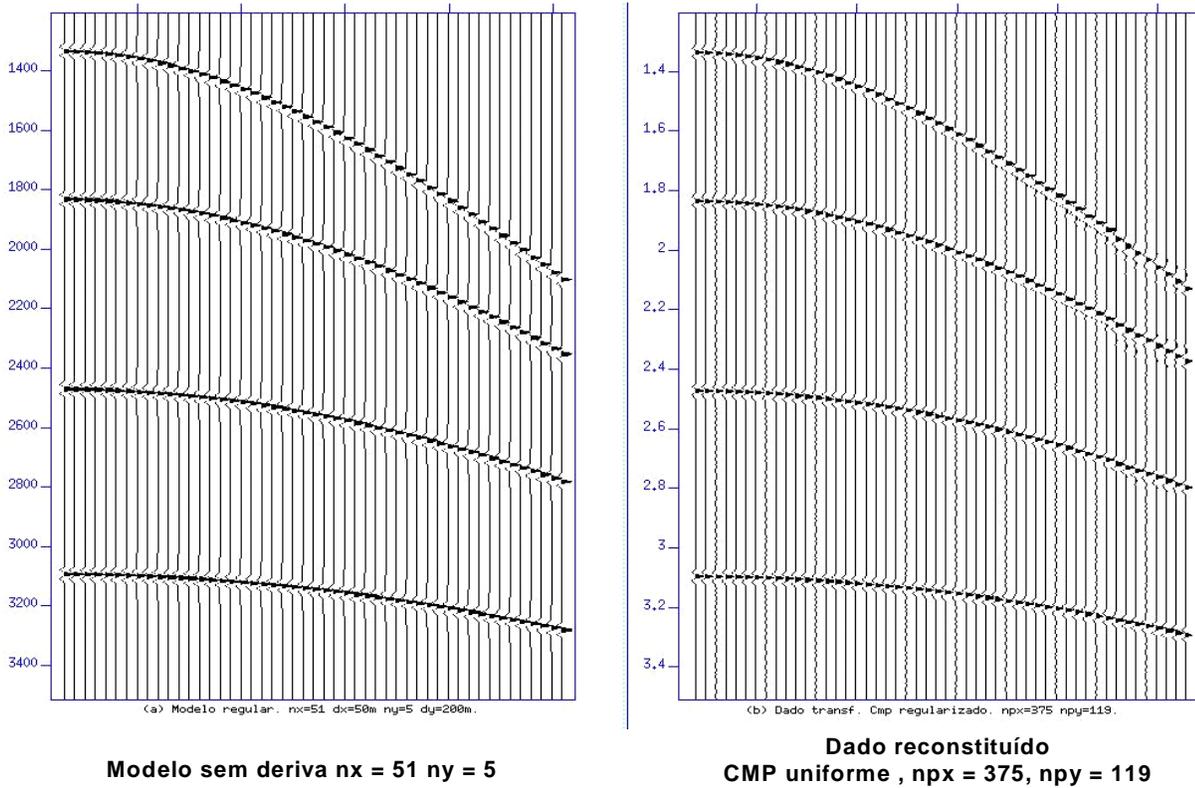


Figura 04 - Regularização 2D. Sismograma de entrada simula pequenas irregularidades entre receptores.



Modelo deriva de cabos:  $n_x = 51$ ,  $\Delta x = 50m$ ,  $n_y = 5$ ,  $\Delta y = 200m$ . Coordenadas fonte (0,0).

Figura 05 – Esquema de aquisição de dados 3D marítimo com deriva de cabos.



**Modelo sem deriva  $n_x = 51$   $n_y = 5$**

**Dado reconstituído  
CMP uniforme ,  $n_{px} = 375$ ,  $n_{py} = 119$**

Figura 6 – Sismograma central do dado reconstituído (direita) com os CMPs regularizados, comparados com um modelo sem deriva (sismograma da esquerda).