



## CRS-PreSTM: Migração pré-empilhamento em tempo usando o operador CRS

José Tassini, CPGeo, Brasil

German Garabito, UFPA, Brasil

Luiz Henrique Gomes Popoff, CPGeo e UFRN, Brasil

Copyright 2009, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation during the 11<sup>th</sup> International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Salvador, Brazil, August 24-28, 2009.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 11<sup>th</sup> International Congress of the Brazilian Geophysical Society 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

The common-reflection-surface (CRS) stacking method produces stacked zero-offset (ZO) sections with a high signal-to-noise ratio, a good definition of the lateral continuity of seismic reflections as well as of reflections with steep dips. The stacking operator of the CRS method depends on three kinematic attributes that are determined through optimization algorithms from the prestack data. In spite of the good results obtained so far with this method, there are still problems to be bypassed, such as the correct simulation of events with conflicting dips and diffraction events. In this work we present one application of the CRS stacking operator in the prestack time migration, i.e., instead of simulating a ZO stacked section, the result is a time migrated section. To demonstrate the efficiency and robustness, we apply this new prestack time migration approach based on CRS method in a synthetic and real land dataset.

### Introdução

Como alternativa ao método clássico de empilhamento sísmico CMP (NMO/DMO), recentemente foi introduzido o método de empilhamento sísmico CRS (*Common-Reflection-Surface*). Aspectos teóricos e algoritmos de implementação deste método podem ser encontrados em Jäguer et al., (2001), Mann (2001) e Garabito et al., (2001). O empilhamento CRS pertence à categoria de métodos que não precisam do conhecimento a priori do modelo de velocidades para produzir seções ZO (*zero-offset*) empilhadas, e pode ser aplicado em dados de meios com variações laterais de velocidades e dados com geometrias de aquisição irregulares. Exemplos de aplicação do método CRS em dados reais 2D e 3D podem ser encontrado em Mann et al. (1999), Trappe et al. (2001), Bergler et al. (2002), Gierse et al. (2003), Garabito et al. (2003), Pruessmann et al., (2004), Eisenberg-Klein et al., (2008), entre outros.

Os exemplos de aplicação mostram que o método CRS apresenta resultados com qualidade superior quando comparados com os resultados do método de empilhamento CMP (NMO/DMO), da migração pré-empilhamento em tempo (*prestack time migration* - PreSTM) e inclusive com a migração pré-empilhamento em profundidade (*prestack depth migration* - PreSDM). Esta melhor qualidade refere-se aumento da razão sinal-

ruído, melhor definição de estruturas complexas, principalmente de refletores com curvatura e com mergulhos acentuados.

No entanto, o método de empilhamento CRS apresenta algumas limitações importantes como perda de resolução em refletores com pequenas descontinuidades (falhas), reconstrução parcial de difrações e não correta simulação de eventos com mergulhos conflitantes, entre outros. Estas deficiências, que ainda não foram resolvidas de maneira satisfatória, podem ter conseqüências negativas nos resultados de etapas posteriores de processamento, como a migração e conseqüentemente na interpretação. Apesar de essas limitações o método CRS constitui-se em uma alternativa importante no processamento sísmico rotineiro, principalmente de dados sísmicos terrestres que em geral apresentam baixa qualidade e razão sinal-ruído, e dados antigos com baixa cobertura.

Com o intuito de contornar as deficiências do método CRS, no presente trabalho apresentamos um novo método de migração pré-empilhamento em tempo baseado no método CRS. Este novo método denominado aqui de CRS-PreSTM também incorpora as principais vantagens do método CRS e neste trabalho serão apresentados exemplos de aplicação em dados 2D sintéticos e reais.

### Metodologia

#### Empilhamento CRS

O operador do método de empilhamento CRS é uma aproximação hiperbólica generalizada dos tempos de trânsito com relação aos domínios do afastamento e do ponto médio. Em 2D, esta aproximação de segunda ordem dos tempos de trânsito ao redor do um ponto  $(t_0, \xi_0)$  na seção ZO tem a forma (e.g., Höcht et al., 1999)

$$t^2(\xi_m, h) = (t_0 + 2p^{(\xi)}\Delta\xi)^2 + 2t_0 \left( M_N^{(\xi)}\Delta\xi^2 + M_{NIP}^{(\xi)}h^2 \right), \quad (1)$$

com  $\Delta\xi = \xi_m - \xi_0$ , sendo  $\xi_0$  o ponto de emergência do raio central e  $t_0$  o tempo de trânsito duplo do mesmo raio. As coordenadas  $\xi_m$  e  $h$  são, respectivamente, o ponto médio e o meio afastamento. Os parâmetros  $p$ ,  $M_{NIP}$  e  $M_N$  são dados por:

$$p^{(\xi)} = \frac{\sin \alpha}{v_0}, \quad M_N^{(\xi)} = \frac{\cos^2 \alpha}{v_0} K_N, \quad M_{NIP}^{(\xi)} = \frac{\cos^2 \alpha}{v_0} K_{NIP}.$$

A velocidade próxima a superfície  $v_0$  é conhecida, e os três parâmetros ou atributos CRS desconhecidos e que são determinados a partir dos dados sísmicos são: o ângulo de emergência do raio central,  $\alpha$ , a curvatura da frente de onda normal,  $K_N$ , e a curvatura da frente de onda do ponto de incidência normal,  $K_{NIP}$  (Hubral, 1983).

O método de empilhamento CRS está baseado no uso da expressão (1) para definir o operador de empilhamento e somar as amplitudes coerentes dos eventos de reflexão para cada ponto da seção ZO a ser simulada. Portanto, o problema principal deste método é a determinação a partir dos dados sísmicos dos três atributos cinemáticos ( $\alpha$ ,  $K_{NIP}$ ,  $K_N$ ), também chamados de parâmetros CRS, para cada ponto de amostragem da seção ZO a ser simulada. A determinação destes parâmetros é realizada por meio de métodos de otimização multidimensional utilizando como função objetivo a medida de coerência (semblance). Como mostrado em Jägger et al., (2001) e Garabito et al., (2001) os parâmetros CRS podem ser determinados em diferentes etapas. No entanto, no presente trabalho os três parâmetros CRS são determinados simultaneamente por meio da aplicação do algoritmo de otimização global Simulated Annealing (Kirkpatrick et al., 1983).

### Migração PreSTM usando o operador CRS

O método de migração de Kirchhoff é um dos métodos clássicos de imageamento sísmico que está baseada na teoria da função de Green e na solução integral da equação da onda. A forma geral da integral de migração de Kirchhoff é dada por (Martins et al., 1993):

$$I(M, t) = \int_{\Omega} d\xi W(M, \xi) D U(\xi, t)|_{t=\tau_D(\xi, M)} \quad (2)$$

em que  $I(M)$  é a amplitude migrada para um dado ponto  $M$  da seção migrada. Os traços sísmicos,  $U(\xi, t)$ , da seção de entrada (e.g., *common offset* - CO) são descritos pelo parâmetro de configuração  $\xi$ . Para cada ponto  $M$  da seção de saída, a integral é avaliada nos valores das amplitudes da seção sísmica de entrada,  $U(\xi, t)$ , ao longo da curva de Huygens,  $\tau_D(\xi; M)$ , dentro da abertura  $\Omega$ , e ponderada pela função peso  $W(\xi; M)$  para remover da amplitude migrada o efeito do espalhamento geométrico. Repetindo essa operação para todos os pontos da seção de saída obtém-se a seção migrada. Para o caso 2.5-D, o operador  $D$  corresponde à meia derivada em relação ao tempo aplicada nos dados de entrada, que devem ser traços analíticos.

Neste trabalho, apresenta-se um novo procedimento de migração pré-empilhamento em tempo usando o operador CRS. De maneira similar a migração proposta por Sun et al., (2000), a migração apresentada neste trabalho está baseada nos conceitos da migração tipo Kirchhoff e da contribuição do empilhamento de traços na vizinhança do traço a ser migrado (*beam stack*). Em outras palavras, na migração Kirchhoff usando a integral (2) os traços da seção de entrada são migrados uma de cada vez para um ponto imagem da seção de saída ou migrada. Assim, à contribuição de um grupo de traços na vizinhança do traço a ser migrado para um ponto imagem da seção de saída. Para o empilhamento dos traços em uma dada vizinhança é utilizado o operador CRS. Dessa forma, o dado a ser migrado pela equação (2), deve ser obtido pela seguinte operação:

$$U^*(\xi, t) = \sum_{j=1}^N U_{j,t(j)} \quad (3)$$

onde  $U_{j,t(j)}$  é a amplitude do dado sísmico indexado pelo número de traços ( $j=1, \dots, N$ ) e pela curva de empilhamento  $t(i)$ . Esta curva de empilhamento é definida pela aproximação (1) na vizinhança do traço a ser migrado localizado na posição  $\xi$ . Portanto, na migração proposta o novo dado a ser migrado,  $U^*(\xi, t)$ , pela integral Kirchhoff (2) resulta do empilhamento de traços vizinhos conforme a expressão (3). Devido ao fato de que o traço a ser migrado pela integral (2) resulta da contribuição dos traços vizinhos cujas amplitudes são somadas usando o operador CRS, denominamos a esta migração como CRS PreSTM.

### Exemplos

O algoritmo de migração desenvolvido neste trabalho foi aplicado em dados sintéticos e reais. Para comparação, os mesmos dados serão processados com o tradicional método de migração Kirchhoff PreSTM. No caso dos dados sintéticos também será mostrado o resultado da migração Kirchhoff pós-empilhamento aplicada na seção ZO empilhada pelo método CRS.

Os programas de migração e de empilhamento CRS utilizados para produzir os resultados mostrados a seguir foram desenvolvidos no Centro Potiguar de Geociências - CPGeo.

### Dados sintéticos

Foram gerados dados sintéticos de cobertura múltipla usando um programa de diferenças finitas do pacote Seismic Unix (Cohen e Stockwell, 2000). O modelo consiste de três camadas homogêneas separadas por duas interfaces, com a segunda interface tendo fortes discontinuidades (Figura 1). O dado sísmico está composto por 230 registros com 48 traços cada. O espaçamento entre fontes e receptores é de 25 m, com offset mínimo de 25m e máximo de 1200m. Para testar a robustez e eficiência dos algoritmos de migração, neste dado sintético foi adicionado ruído aleatório com uma razão sinal-ruído igual a 1. Devido a esta baixa razão sinal-ruído, nos dados pré-empilhados praticamente não se observam os eventos de reflexões das duas interfaces.

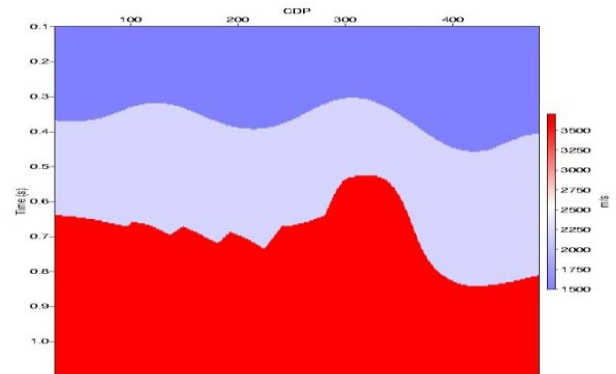


Figura 1 – Modelo sintético composto por três camadas homogêneas. O segundo refletor apresenta discontinuidades.

O modelo de velocidades utilizado na migração foi obtido a partir da transformação para o domínio do tempo do modelo mostrado na Figura 1. Este modelo de velocidades foi suavizado antes de ser usado na migração.

Na Figura 2 mostra-se o resultado da migração Kirchhoff PreSTM. A Figura 3 mostra o resultado da migração pré empilhamento em tempo CRS-PreSTM, proposto neste trabalho. Para uma comparação fidedigna em ambos os resultados foram aplicados os mesmos filtros e ganhos. Devido à baixa razão sinal-ruído dos dados de entrada na migração Kirchhoff as reflexões tem baixa definição, principalmente nos trechos onde tem maiores inclinações e também na parte onde o refletor apresenta descontinuidades. O resultado da migração CRS PreSTM apresenta grande aumento na razão sinal-ruído e os eventos de reflexão melhor definidas, tanto nas partes com fortes inclinações e nas partes com descontinuidades.

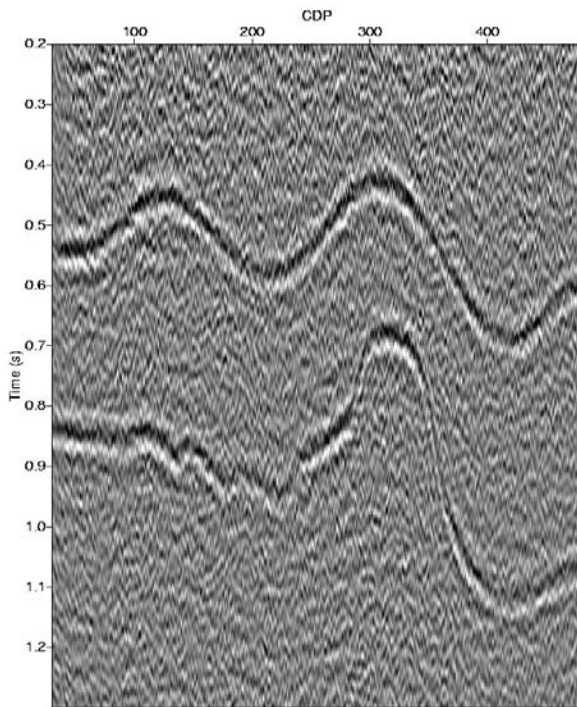


Figura 2 – Seção migrada em tempo resultante da migração Kirchhoff PreSTM.

Nesses mesmos dados foi aplicado o método de empilhamento CRS para obter a seção ZO empilhada. Na Figura 4 mostra-se o resultado da migração Kirchhoff pós-empilhamento em tempo aplicada na seção ZO resultante do método CRS. O modelo de velocidades utilizado foi o mesmo utilizado na migração pré-empilhamento. Neste resultado as reflexões também têm melhor definição do que na seção obtida da migração Kirchhoff PreSTM, tanto na partes com fortes inclinações e inclusive na parte descontinuidades. No entanto, quando comparado com o resultado da migração CRS PreSTM, o resultado da migração pós-empilhamento tem menor qualidade, que pode ser observada também nas

partes com maiores inclinações e com descontinuidades no segundo refletor.

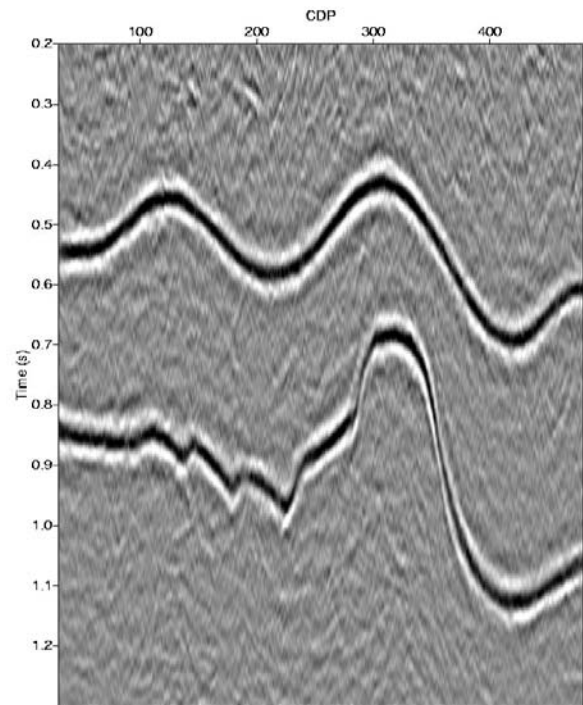


Figura 3 – Seção migrada em tempo resultante da migração CRS PreSTM.

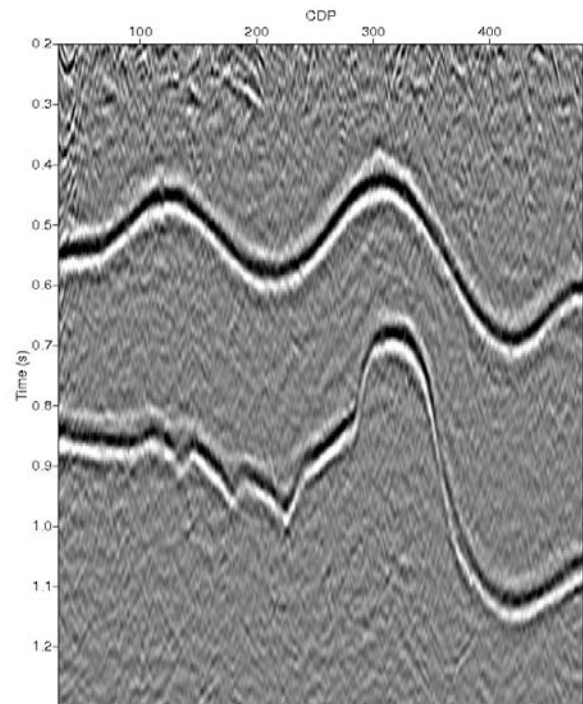


Figura 4 – Seção migrada em tempo resultante da migração Kirchhoff pós-empilhamento aplicada na seção empilhada pelo método CRS.

## Dados reais

O método de migração pré-empilhamento CRS-PreSTM também foi aplicado em dados reais de uma linha terrestre da Bacia do Recôncavo. Este dado está composto por 180 seções fonte comum, com 48 canais cada e tem uma cobertura de 24 traços. Intervalo entre fontes e receptores de 50m, e afastamentos mínimo e máximo de 100m e 2450m, respectivamente.

Antes da migração este dado foi tratado passando por todas as etapas de processamento rotineiramente utilizadas na indústria, gerando-se também o modelo de velocidades a ser utilizado na migração. Nas Figuras 5 e 6 mostram-se os resultados da migração Kirchhoff PreSTM e da migração proposta neste trabalho. Também para uma comparação fidedigna foram aplicados os mesmos processos nas duas seções migradas. O resultado da migração Kirchhoff PreSTM mostra uma razão sinal-ruído baixa, com baixa definição das reflexões com maiores inclinações e curvadas. Contrariamente, o resultado da migração CRS PreSTM mostra melhor definição dos refletores tanto sub-horizontais como inclinados e curvados.

## Conclusões

Neste trabalho foi apresentada uma nova migração pré-empilhamento em tempo combinando conceitos da migração Kirchhoff, do *beam stack* e do método CRS. A aplicação desta migração CRS-PreSTM em dados sintéticos com razão sinal-ruído muito baixa, como é o caso dos dados sintéticos, mostra a robustez e eficiência deste novo algoritmo de migração, fornecendo resultados com maior qualidade do que o método clássico de migração Kirchhoff PreSTM e do próprio empilhamento CRS seguido da migração pos-empilhamento em tempo. De maneira similar, a aplicação em dados reais com baixa cobertura mostra também uma clara superioridade comparada com a migração Kirchhoff PreSTM. Estes resultados mostram que este método de migração proposto se constitui em uma excelente alternativa para a migração de dados sísmicos no domínio do tempo.

## Agradecimentos

Agradecemos a Alvorada Petróleo S/A pela permissão para apresentar os dados reais mostrados neste trabalho.

## Referências

- Bergler, S., Marchetti, P. H. P., Cristini, A., Cardone, G., 2002. 3d common-reflection-surface stack and kinematic wavefield attributes. *The Leading Edge* 21 (10), 1010–1015.
- Cohen, J. K; Stockwell Jr., J. W., 2000, CWP / SU: Seismic Unix Release 34 : a free package for seismic research and processing. Center for Wave Phenomena, Colorado School of Mines.
- Garabito, G., Cruz, J. C., Hubral, P., and Costa, J., 2001, Common reflection surface stack: A new parameter search strategy by global optimization. *71th. SEG*

- Mtg., Expanded Abstracts. San Antonio, Texas, USA.*
- Garabito, G., Cruz, J. C., Eiras, J., and Queiroz, N. P., 2003, Application of the crs stack to seismic data of amazon paleozoic basin. *8th. International Congress of Brazilian Geophysical Society, Expanded Abstracts. Rio de Janeiro, Brazil.*
- Gierse, G., Pruessmann, J., Laggiard, E., Boennemann, C., Meyer, H., 2003. Improved imaging of 3d marine seismic data from offshore costa rica by CRS processing. *First Break*, 45–49.
- Höcht, G., de Bazelaire, E., Majer, P., and Hubral, P., 1999, Seismic and optics: Hyperbolae and curvatures. *J. Appl. Geophys.*, 42(3):261–281.
- Hubral, P., 1983. Computing true amplitude reflections in a laterally inhomogeneous earth. *Geophysics* 48, 1051–1062.
- Jäger, R., Mann, J., Höcht, G., and Hubral, P., 2001, Common reflection surface stack: Image and attributes. *Geophysics*, 66:97–109.
- Kirkpatrick, S., Gelatt, C., and Vecchi, M., 1983, Optimization by simulated annealing. *Science*, 220:671–680.
- Mann, J., Jäger, R., Müller, T., Höcht, G., Hubral, P., 1999. Common-reflection-surface stack - a real data example. *Journal of Applied Geophysics* 42, 301–318.
- Mann, J., 2001. Common-reflection-surface stack and conflicting dips. In *Extended Abstracts, 71th Annual Internat. Mtg., Expl. Geophys.*
- Martins, J., Schleicher, J., Tygel, M., and Santos, L., 1997, 2.5-D true-amplitude migration and demigration: *J. Seis. Expl.* 6, 159-180.
- Pruessmann, J., Coman, R., Enders, H., Trappe, H., 2004. Improved imaging and avo analysis of a shallow gas reservoir by crs. *The Leading Edge* 23 (9), 915–918.
- Sun, Y., Qin, F., Checkles, S., and Leveille, P. J., 2000, 3-D prestack Kirchhoff beam migration for depth imaging. *Geophysics*, 65:1592-1603.
- Trappe, H., Gierse, G., Pruessmann, J., 2001. Case studies show potential of common reflection surface stack - structural resolution in the time domain beyond the conventional NMO/DMO stack. *First Break* 19, 625–633.



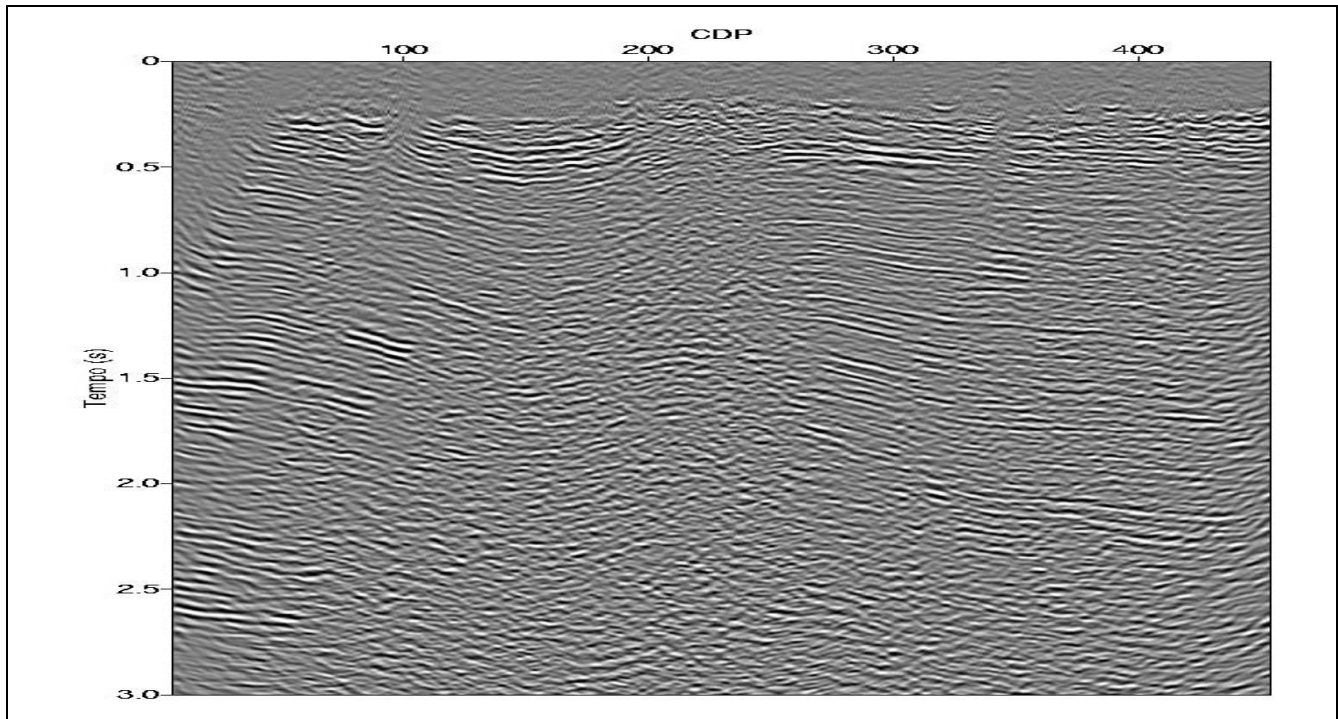


Figura 5 – Seção migrada em tempo resultado da migração Kirchhoff PreSTM.

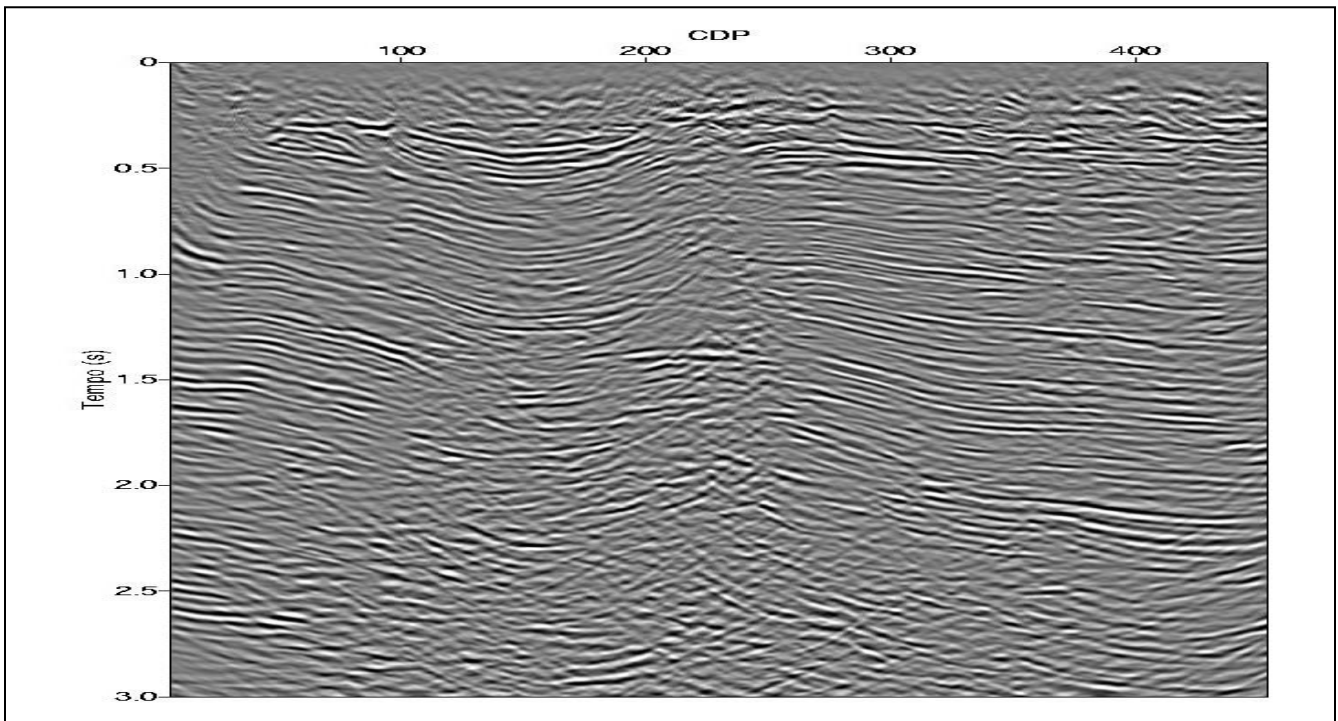


Figura 6 – Seção migrada em tempo resultado da migração CRS PreSTM.