



## Reflexão Sísmica Rasa: detecção de interface Basalto/Arenito em projeto de barragem.

Liliana Alcazar Diogo, IAG/USP, Rafael Ludwig Herzig, IAG/USP

Copyright 2003, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation at the 8<sup>th</sup> International Congress of The Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brazil, 14-18 September 2003.

Contents of this paper were reviewed by The Technical Committee of The 8<sup>th</sup> International Congress of The Brazilian Geophysical Society and does 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

We performed seismic reflection and refraction data to get subsurface information in order to aid a dam construction project. The refraction technique was used to study the near surface structure and the main objective of the reflection survey was to image a contact of Basalt/Sandstone.

Seismic reflection data was severely affected by statics and reverberations. Digital data processing was able to increase the resolution and signal-to-noise ratio.

Seismic data showed that the near surface structures are very complex with the presence of a semi-hidden layer, which require more refraction data density to characterize them

The work has shown promising results so far, and the continuity of the seismic application in this project is encouraging.

### Introdução

No presente trabalho foi realizado um levantamento de reflexão sísmica rasa para um estudo de caso da Barragem Piraju II pertencente a CBA – Companhia Brasileira de Alumínio, localizada na cidade de Piraju – São Paulo. No presente caso, se busca obter informações estruturais de subsuperfície que subsidiarão o projeto.

Foi proposta a integração de dados de refração sísmica rasa para a obtenção do modelo intervalar de velocidades sísmicas. Os dados de reflexão sísmica rasa sofrem interferência de ondas superficiais e chegadas diretas que se superpõem à energia refletida, impossibilitando em alguns casos a identificação dos eventos refletidos em alvos muito rasos. Além disso, dependendo das condições de transmissão de energia do terreno investigado, o método de reflexão pode não apresentar resolução suficiente para permitir a identificação de camadas com espessura muito pequena. Embora, alguns trabalhos publicados reportem sucessos na aplicação do método de

reflexão para identificação de interfaces inferiores a 5m (Baker, 1999), também são reportadas observações a respeito de limitações encontradas no emprego do método (Steeple et al., 1997). O método sísmico de refração pode ser uma alternativa a ser empregada para a obtenção do modelo de velocidades próximo à superfície, cujas informações podem ser integradas ao processamento e interpretação dos dados de reflexão. Exemplos da utilização de metodologias integrando dados de refração e reflexão sísmica rasa são apresentados por Miller *et al.*, 1998 e Le Diagon, 2000.

Em sondagens diretas realizadas próximas da área em que foram executados os levantamentos sísmicos, foi identificada a existência de arenitos intertrapianos. Portanto, um dos objetivos deste trabalho é delimitar os contatos de topo e base desses arenitos. Além disso, pretende-se verificar as estruturas e falhamentos existentes em subsuperfície e avaliar a possibilidade em se identificar a presença de fraturas na camada de basalto.

### Levantamentos sísmicos

Na execução dos levantamentos utilizou-se um sismógrafo digital de 24 canais da Geometrics Smartseis; geofones com frequência natural de 100Hz para reflexão; 28 e 14Hz para refração e como fonte de energia, uma marreta de 10Kg, com gatilho de contato sobre placa de metal.

Para todas as aquisições foi utilizado um intervalo de amostragem em tempo igual a 0,125ms; o comprimento do registro foi fixado em 256ms, com um *delay time* de 10ms e empregado um filtro Notch (60Hz) analógico. Nos levantamentos de refração também foi utilizado um filtro analógico corta-alta acima de 250Hz.

### Reflexão

A primeira etapa de um levantamento sísmico de reflexão rasa é a aquisição de sismogramas para análise de ruído (*walkaway noise test*), com o objetivo de reconhecer os eventos refletidos e determinar a janela de afastamentos ideais para a execução do levantamento.

Dois procedimentos foram efetuados. O primeiro, denominado de pseudo-análise de ruído, é rápido de ser executado, porém não oferece uma amostragem contínua em subsuperfície. consiste

em manter o conjunto de geofones fixos e mover o ponto de tiro a intervalos iguais ao tamanho do lanço, de modo a aumentar sucessivamente o afastamento fonte-receptor. Foram efetuados 8 pontos de tiro espaçados de 12m, em consequência do intervalo de geofones que foi fixado em 0,5m, amostrando-se portanto, afastamentos de 0,5 a 96m.

Os sismogramas obtidos indicaram uma estrutura superficial muito irregular, nitidamente observada nos acentuados deslocamentos em tempo dos eventos sísmicos entre os traços correspondentes às posições das emendas de cada sismograma, o que resultou em uma grande dificuldade na identificação das reflexões. Sendo assim, para se obter uma visualização adequada das reflexões, efetuou-se um segundo procedimento que garante uma amostragem contínua em subsuperfície, no qual o ponto de tiro é mantido fixo e o conjunto de geofones é deslocado, de modo a amostrar afastamentos fonte-receptor sucessivamente maiores. Este procedimento tem um tempo de operação bem maior que o anterior, mas fornece uma amostragem adequada dos eventos sísmicos em função do afastamento fonte-receptor.

Para agilizar o trabalho, o ponto de tiro foi fixado na posição do último ponto de tiro da pseudo-análise de ruído e foi utilizado um espaçamento entre geofones de 1m. Desta forma, com a execução de quatro pontos de tiro alcançou-se o afastamento igual a 96m.

No sismograma resultante, apresentado na Figura 1, foi assinalado em amarelo dois eventos que nitidamente se destacavam na imagem disponível para a visualização dos dados no campo, a qual foi obtida através da impressão individual dos sismogramas. Em função dessas observações, escolheu-se o afastamento mínimo de 30m. O afastamento máximo foi de 64m, em função da metodologia empregada, descrita a seguir, utilizando um espaçamento entre geofones de 1m.

O levantamento de reflexão foi efetuado segundo a técnica CMP, porém com um arranjo de campo não convencional. O conjunto de 24 geofones é mantido na mesma posição durante a execução de 12 pontos de tiro (metade do número de geofones, quando o intervalo entre os pontos de tiro for igual ao intervalo entre geofones). A seguir os 12 primeiros geofones são movidos para o final do arranjo e são efetuados mais 12 pontos de tiro na seqüência dos anteriores, e assim, sucessivamente. Desta forma garante-se uma multiplicidade de 1200% para cada ponto em subsuperfície. Foram executados um total de 120 pontos de tiro, originando 240 CMPs com grau de cobertura máxima.

### **Refração**

Prevendo uma possível falta de resolução do método de reflexão para o imageamento dos primeiros metros em subsuperfície, efetuaram-se dois levantamentos de refração sísmica para determinar o topo do basalto e as estruturas próximas da superfície.

O primeiro levantamento, padrão em aplicações para engenharia na determinação do topo rochoso, consistiu do procedimento de campo conhecido como "arranjo convencional". Foram utilizados 12 geofones espaçados de 10m. O básico do procedimento de campo de refração consiste em efetuar 5 pontos de tiro, um central e dois em cada um dos extremos do arranjo de geofones, sendo os tiros externos distantes 30m do primeiro e do último geofones, respectivamente

Um segundo levantamento foi efetuado, com um espaçamento entre geofones de 2m e 24 canais, para investigar se a cobertura acima do basalto é composta por mais do que uma camada.

### **Processamento e interpretação**

#### **Refração**

Os dados foram processados pelo pacote SIP (*Seismic Refraction Interpretation Programs*) da Rimrock Geophysics, que permite a aplicação de filtros de frequência (no caso não houve a necessidade da aplicação de filtros) e apresenta recursos de visualização para ampliar os sinais referentes às primeiras quebras e para efetuar a leitura dos tempos de chegada das ondas sísmicas. A dromocrônica obtida para os dados adquiridos, os tempos de intercepção e as velocidades, determinadas através da função  $\theta(x)$  (Gurvich, 1972), são apresentados na Figura 2.

Foi determinada uma velocidade de 4800m/s para o topo do basalto. A velocidade da onda direta igual a 700m/s foi observada em todos os ensaios de refração, inclusive nos registros da análise de ruído. O levantamento com espaçamento entre geofones de 2m mostrou a presença de uma camada intermediária entre o solo residual e o topo rochoso, extremamente irregular, pois, não foi observada em todos os sismogramas da linha, não sendo possível a determinação da sua velocidade e espessura. A existência dessa camada intermediária também foi observada nos registros da análise de ruído.

Com o resultado final, obtido do levantamento com espaçamento de 10m entre geofones, a partir dos tempos de intercepção (Figura 2) foi confeccionada a seção apresentada na Figura 3.

### **Reflexão**

O processamento dos dados foi realizado com o pacote *SU-Seismic Unix* (Cohen & Stockwell, 2003).

Uma inspeção inicial dos registros revelou que os dados se apresentam fortemente afetados por distúrbios de origem estática e reverberações.

A correção estática residual com base em processos de correlação dos sinais refletidos corrigidos de NMO não foi viável para o conjunto de dados em questão. As reflexões rasas são muito próximas de outros sinais coerentes, a intervalos de tempo da mesma ordem dos deslocamentos referentes às distorções estáticas, o que faz com que os processos de correlação falhem. O efeito da estática afeta igualmente as refrações e reflexões rasas, pois, o caminho percorrido pela porção do raio sísmico que atravessa a camada superficial de baixa velocidade (CBV), tanto para os eventos refratados na base da CBV como para os eventos refletidos nas interfaces subjacentes são similares (Hatherly *et al*, 1994). Portanto, para calcular a correção estática a ser aplicada nas reflexões, foram utilizadas as diferenças relativas dos tempos de chegada da refração no topo da camada intermediária. Essa refração pôde ser observada como chegada secundária em tempo, devido à resolução dos dados obtida com o geofone de 100Hz.

Além da correção estática, foi necessário empregar vários recursos de processamento digital, tais como, deconvolução, filtros de frequência e filtro *fk*.

A análise de velocidades foi efetuada, principalmente avaliando a qualidade do empilhamento. Apenas para alguns CMPs foram construídos painéis de NMO. A imagem da seção sísmica empilhada forneceu resultados ambíguos para o processo dentro de um intervalo grande de velocidades, uma análise do empilhamento realizada individualmente sobre alguns traços da seção empilhada permitiu reduzir essa faixa de ambigüidade. Após a execução de cada novo parâmetro de processamento, os dados foram inspecionados e o processo de análise de velocidades foi feito, de modo a sempre avaliar se alguma estrutura estava sendo criada ou eliminada, como um resultado artificial decorrente dos processos numéricos envolvidos.

Durante a evolução do processamento, foi observado que os eventos previamente identificados no campo (Figura 1, em amarelo) tratavam-se provavelmente de reflexões múltiplas e o evento assinalado em azul na Figura 1 é que se refere à reflexão no topo do arenito.

Nas Figuras 4 e 5 são apresentadas as seções empilhadas após a correção estática, sem e com deconvolução pré-empilhamento, respectivamente. A deconvolução mostrou-se fundamental para eliminar reverberações e aumentar a resolução dos registros de reflexão. A observação dos espectros de amplitude antes e depois da deconvolução reforçou a confiança no processo. A deconvolução fez o espectro se tornar plano e aumentou a largura da banda de frequência.

A imagem das seções sísmicas abaixo de 0,08s está totalmente contaminada pelo falseamento da onda aérea, que só poderia ser eliminado através de um filtro de frequência, cortando acima de 150Hz, frequências essas fundamentais para os sinais investigados.

Foi observado que para grande parte dos sismogramas CMP ainda havia uma superposição de eventos com velocidades diferentes. Propôs-se então aplicar um filtro *fk* nos sismogramas CMP, cortando eventos com velocidades inferiores a 2500m/s, de modo a ressaltar as reflexões que apresentem velocidades mais altas.

Na Figura 6 é apresentada a seção final, com a imagem em escala de densidade de cores variável para ressaltar o valor das amplitudes negativas, representativas da reflexão no topo do arenito.

Devido à falta de resolução do método de reflexão na porção mais rasa e as informações disponíveis da refração não serem suficientes para caracterizar a camada intermediária entre o solo e o topo do basalto, não foi possível determinar um valor específico para o modelo intervalar de velocidades. Contudo, foi possível obter algumas informações a respeito da velocidade da camada intermediária, que está em torno de 2600m/s, e que a sua espessura varia de 2 a 8m ao longo da linha. Com isso, chegou-se a conclusão de que o topo do arenito não deve exceder a 60m e que sua velocidade estaria em torno de 4600m/s.

### **Discussões e Conclusões**

As etapas de processamento efetuadas sobre os registros de reflexão proporcionaram uma sensível melhora na razão sinal/ruído e na resolução dos dados. Apesar de todos os recursos empregados, ainda assim, as reflexões interpretadas como sendo o topo do arenito sofrem a influência da superposição de outros eventos, e por isso, a imagem não é uniforme ao longo de toda a seção.

Acredita-se que o trabalho desenvolvido apresenta resultados promissores e constitui um tema de pesquisa que deve ser melhor explorado. O próximo passo deveria ser a realização de uma nova campanha para a aquisição de dados de

reflexão e refração. Propõem-se a utilização de um afastamento fonte-receptor mínimo igual a 18m, mantendo o procedimento não convencional adotado para a aquisição CMP e planejando alguns pontos de tiro adicionais a serem executados durante o levantamento de reflexão para compor os sismogramas para interpretação das refrações.

### Referências

Baker, G.S., 1999, Processing near-surface seismic reflection data – a primer: Course notes series nº 9: Soc. Explor. Geophys.

Cohen, J. K. and Stockwell, Jr. J. W., 2003, SU - Seismic Unix, release 36: a free package for seismic research and processing, Center for Wave Phenomena, Colorado School of Mines.

Gurvich, I., 1972. Seismic Prospecting. Moscow: Mir Publishers. 463 p.

Hatherly, P. J., Urosevic, M., Lamourne, A., and Evans, B. J., 1994, A simple approach to

calculating refraction static corrections: Geophysics, **59**, 156-160.

Le Diagon, F. M.M., 2000, Investigações sobre metodologias de aquisição e interpretação de dados sísmicos de reflexão rasa. Dissertação de Mestrado: IAG, Universidade de São Paulo.

Pugin, A. and Pullan, S. E., 2000, First-Arrival Alignment Static Correction Applied to Shallow Sismic Reflection Data, Journal of Environmental and Engineering Geophysics, **5**, 7-15.

Steeple, D. W., Green, A. G., McEvilly, T. V., Miller, R. D., Doll, W. E., Rector, J. W., 1997, A workshop examination of shallow seismic reflection surveying: The Leading Edge, **16**, 1641-1647.

### Agradecimentos

Ao aluno Carlos Eduardo Afonso Gonçalves, pela colaboração nos levantamentos de campo e ao aluno Ivan Jazotte P. De Vasconcelos, pelas discussões durante o desenvolvimento do trabalho.

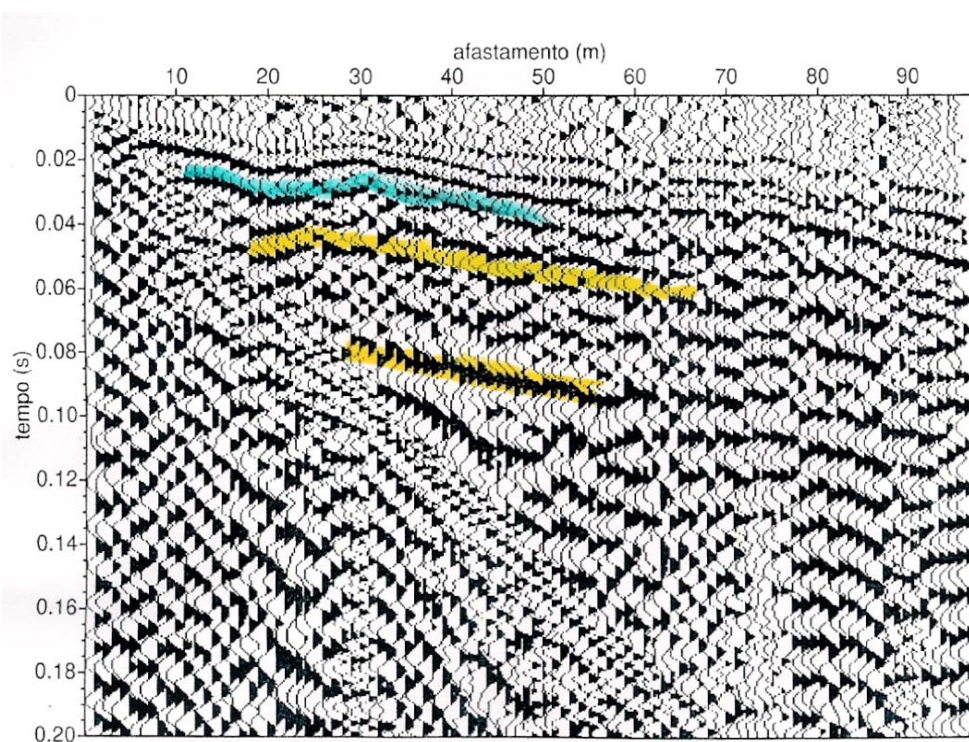


Figura 1 – Análise de ruído para reflexão sísmica rasa.



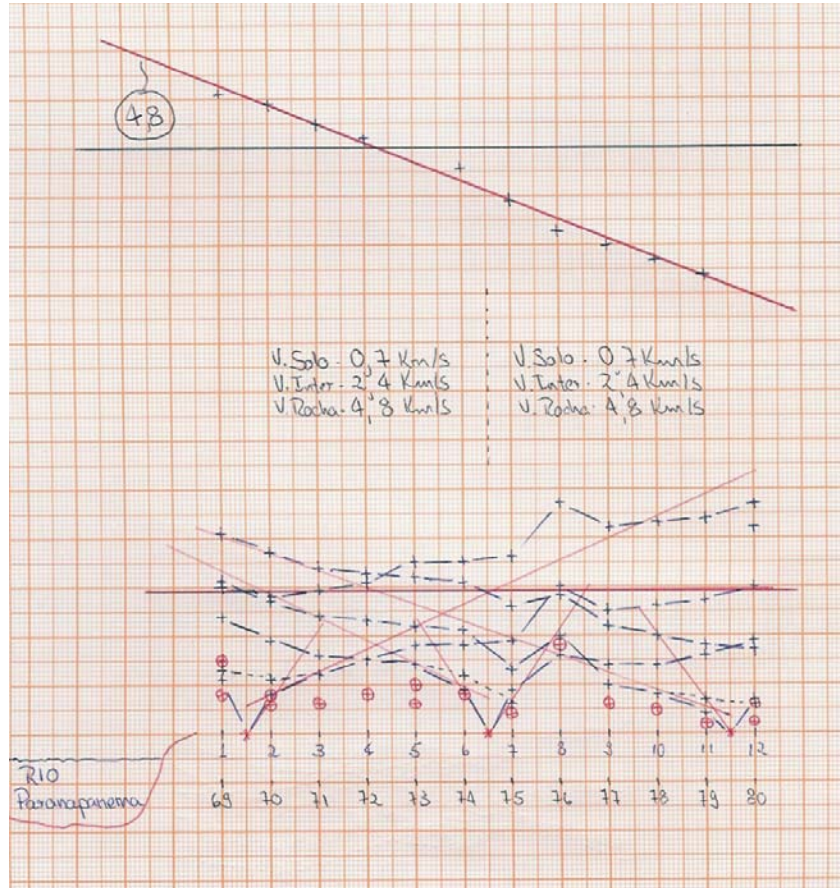


Figura 2 – Dromocrônica, contendo os tempos de interceptação e as velocidades das camadas.

COTAS  
(m)

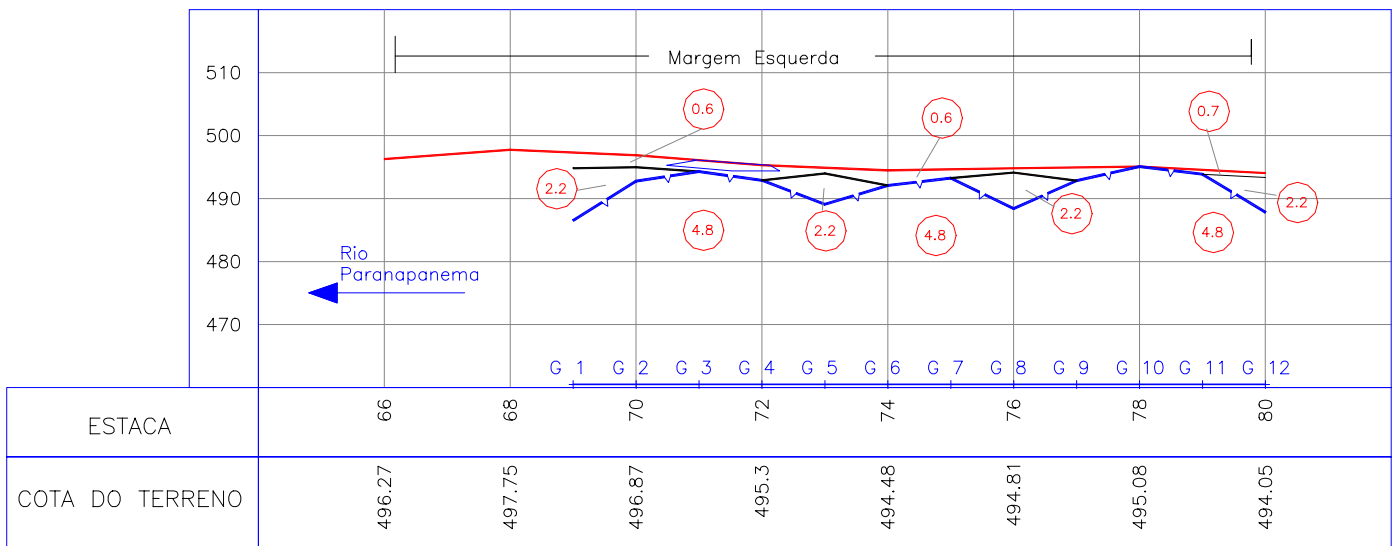


Figura 3 – Seção sísmica obtida da refração.

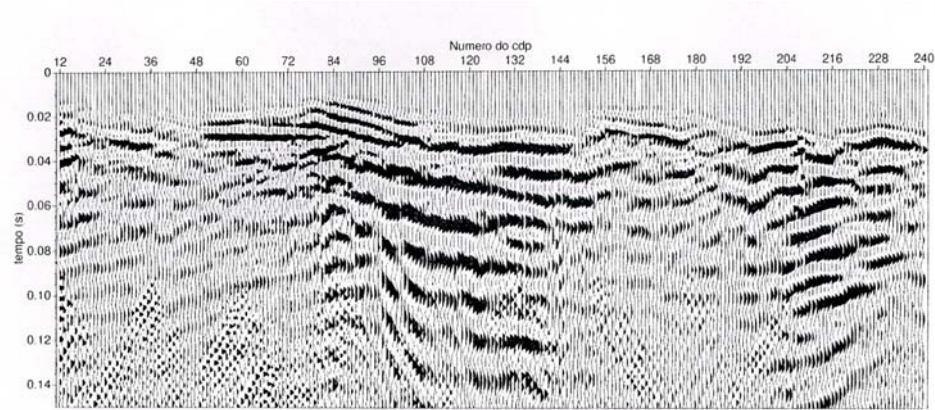


Figura 4 – Seção empilhada obtida após a correção estática.

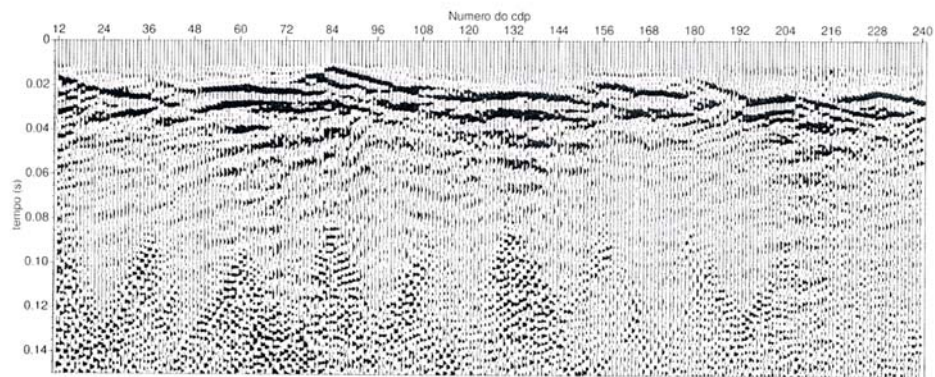


Figura 5 – Seção empilhada após correção estática e deconvolução.

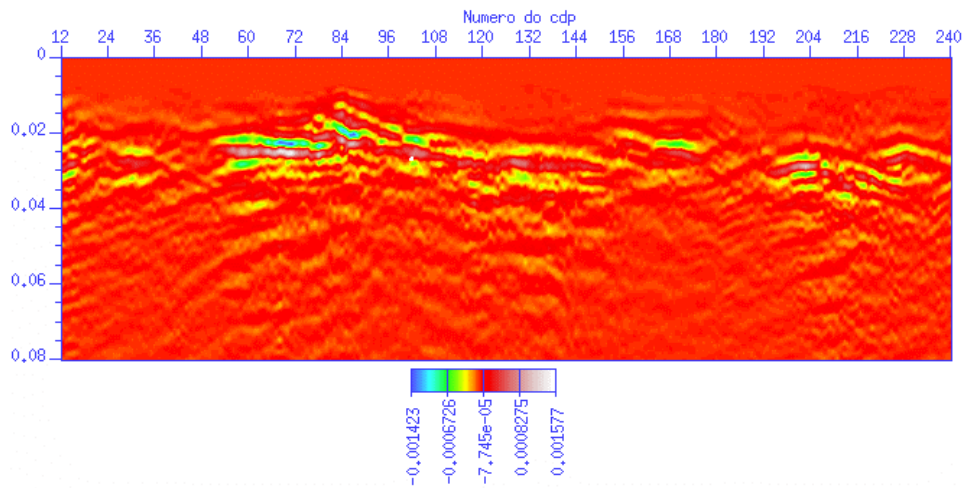


Figura 6 – Seção empilhada apresentada em escala de densidade de cores variável.