



A sísmica de reflexão de alta resolução e o radar de penetração no solo no mapeamento de estruturas rasas complexas. Um estudo dos efeitos da migração.

Rodrigo Silva Nunes^{1*}, Renato Luiz Prado² 1.IAG/USP – atualmente LGC/IMECC/UNICAMP 2.IAG/USP, Brasil

Copyright 2003, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

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

Contents of this paper was reviewed by The Technical Committee of The 8th International Congress of The Brazilian Geophysical Society and does not necessarily represents 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

This paper shows a field experiment employing shallow seismic reflection and ground penetrating radar to image the same nearsurface geology.

The study area presents nearsurface complex geological structures with steep dips and subvertical faults.

The initial motivation was to compare the both images and evaluate the performance of migration on synthetic and real data.

The geophysical data were acquired in a Tertiary sedimentary basin. A sandy layer unconformably overlay Precambrian granites and gneiss with erosional and/or tectonic contact. There are tectonic structures (faults and fractures) in both sediments and bedrock.

We verify the performance of f-k migration on synthetic and real data. Firstly on simple geologic model and more complex one derived from seismic refraction data and field observation. Finally, we applied on a CMP stacking section derived from the collected seismic reflection data. Our data example shows that a superior image was achieved after the f-k migration process.

Introdução

A sísmica de reflexão vem sendo utilizada na exploração de petróleo há várias décadas, porém somente a partir do início dos anos 80 é que a técnica começou a ser também empregada nas áreas de engenharia e meio ambiente, visando investigações normalmente inferiores a 50 metros de profundidade e que exigem maior resolução na definição de seus alvos, daí a origem da denominação, sísmica de reflexão de alta resolução ou sísmica rasa.

Apesar de se utilizar basicamente dos mesmos procedimentos de aquisição e processamento da sísmica de petróleo, há uma série de situações limitantes relacionadas principalmente aos objetivos propostos (alta resolução) e ao local de seu emprego (normalmente áreas urbanas) que vêm demandando contínuas pesquisas e desenvolvimentos, principalmente no campo instrumental (Steeple et al., 1998).

O emprego de algumas rotinas de processamento consideradas essenciais no fluxograma básico da sísmica convencional, como a deconvolução e a migração, ainda é objeto de discussão no meio técnico quanto a sua real eficácia (Black et al., 1994; Steeples &

Miller, 1998). Black et al. (1994) consideram o efeito de migração em dados de reflexão sísmica com profundidade de 5 a 15 metros insignificante, mesmo com evidência de mergulhos íngremes na seção sísmica.

O método GPR ("ground penetrating radar") é de emprego ainda mais recente na investigação geológico-geotécnica rasa (Davis & Annan, 1989; Goodman, 1994), especialmente no Brasil, onde os primeiros trabalhos datam dos anos 90 (Moraes & Botelho, 1997).

Pode produzir imagens de altíssima resolução, porém enfrenta, entre outros, o problema da forte atenuação da onda eletromagnética em meios de baixa resistividade elétrica com conseqüente perda de penetração do sinal. Daí a importância e o interesse no uso conjugado das duas técnicas (Prado, 2000).

No mapeamento de estruturas irregulares, tanto as seções sísmicas empilhadas quanto as seções de GPR apresentam eventos de difração e mau posicionamento dos refletores. De tal forma que, sem a aplicação do processo de migração, a interpretação destas seções torna-se praticamente impossível de ser realizada.

Uma das finalidades da técnica de migração é, portanto, reconstruir a partir do campo de onda registrado na superfície da terra, uma imagem fiel da estrutura em subsuperfície.

Neste trabalho são apresentados os resultados obtidos em ensaios sísmicos e de GPR em áreas de terrenos terciários onde ocorrem descontinuidades subverticais a profundidades próximas de 10 metros.

Geologia da Área

A área de estudos está situada dentro da Bacia Sedimentar de São Paulo, uma das unidades integrantes do denominado Rift Continental do Sudeste do Brasil (Riccomini, 1989).

No local ocorrem sedimentos neocenozóicos e sedimentos terciários da Formação Itaquaquetuba depositados discordantemente sobre o embasamento cristalino em contato erosivo e tectônico.

Estão presentes estruturas tectônicas rúpteis, tanto nos depósitos sedimentares da Formação Itaquaquetuba, quanto no embasamento cristalino, formando planos de juntas e falhas normais, algumas vezes justapondo os sedimentos ao embasamento, como no local onde foram realizados os ensaios geofísicos (detalhe na Figura 1A). As estruturas presentes nos sedimentos são consideradas pós-deposicionais.

Métodos

Na aquisição sísmica foram empregados geofones de 100Hz de frequência natural e sismógrafo digital com

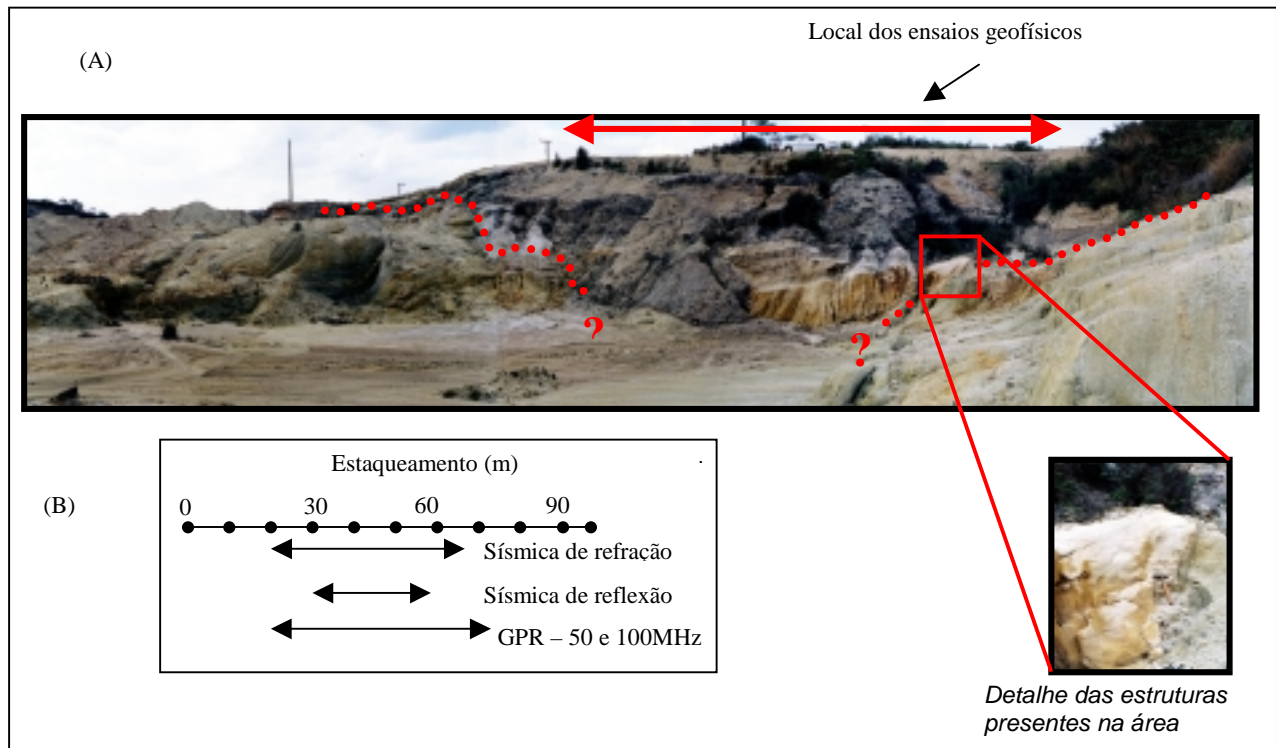


Figura 1. (A) Local de realização dos ensaios geofísicos, com exposição da Formação Itaquaquetuba, embasamento e estruturas presentes. (B) Cobertura do mapeamento de cada método geofísico.

24 canais e conversor A/D de 24 bits. Como fonte de energia de ondas sísmicas utilizou-se uma marreta de 7Kg gerando impactos sobre uma placa de metal. No método GPR utilizou-se antenas de 50 e 100MHz. Os perfis foram coincidentes (com 94 metros de extensão) de modo a mapear as mesmas estruturas geológicas (Figura 1B).

I) Sísmica de Refração

Foi empregado um arranjo de 24 geofones espaçados de dois metros e quatro “pontos de tiro”: dois externos ao arranjo de geofones (*offset* de 24 metros) e dois nas suas extremidades (*offset* de um metro).

Neste projeto, o ensaio de sísmica de refração foi realizado com o objetivo de fornecer subsídios para a análise de velocidades do ensaio de reflexão e para a concepção do modelo geológico utilizado na geração dos sismogramas sintéticos de reflexão.

Na interpretação dos dados utilizou-se o método ABC, que permite o cálculo das profundidades dos refratores para cada posição de geofone.

A Figura 2 apresenta o gráfico tempo-distância com os tempos das primeiras chegadas obtidos para cada tiro. Apresenta também a curva t_v (que define a velocidade média do refrator) e os tempos de interceptação, t_i , obtidos para cada estação de geofone. A Figura 3 apresenta a seção final obtida e que serviu como parâmetro de entrada do modelo que gerou os sismogramas sintéticos da reflexão.

II) Dados Sintéticos

Para analisar os efeitos da migração, foram gerados tra-

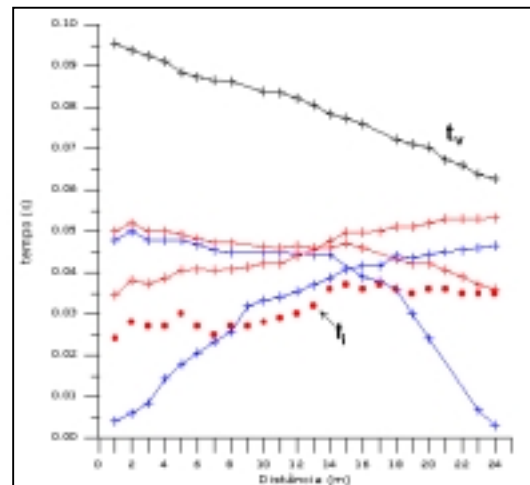


Figura 2. Curva tempo-distância interpretada.

ços sísmicos sintéticos. Foram criados modelos sintéticos geologicamente simples, baseados nos dados obtidos pelo método de refração sísmica, com velocidade de 700 m/s para a primeira camada e 2800 m/s para a segunda (Figura 3). Empregou-se a rotina “*trimodel*” do SU para a geração do modelo geológico. Nesta rotina, é necessário fornecer as coordenadas (x, z) da interface, bem como as velocidades de cada camada.

A análise da migração em dados sintéticos consistiu em estabelecer modelos de interface plana com o mesmo desnível h , e testar rampas com diferentes inclinações,

ou seja, alterou-se o ângulo θ que a rampa faz com a vertical (Figura 4).

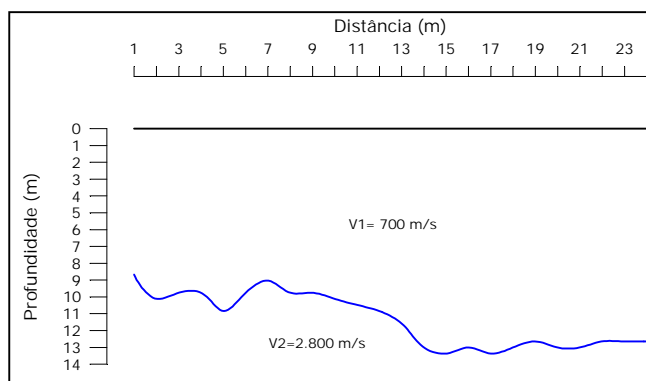


Figura 3. Seção sísmica obtida com os ensaios de refração.

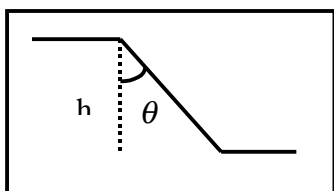


Figura 4. Parâmetros variáveis (h, θ) para os modelos geológicos propostos.

Posteriormente, gerou-se um modelo idêntico ao modelo obtido pelo método de refração sísmica, ou seja, com toda a irregularidade observada.

Trabalhando com a rotina "triseis" do mesmo pacote, pôde-se gerar os registros sísmicos sintéticos (conjuntos de tiro) equivalentes a cada modelo geológico proposto, seguindo a mesma configuração de aquisição sísmica de reflexão realizada na área de estudo (Figura 1).

Após a correção NMO e o empilhamento dos traços de um mesmo conjunto CMP, obteve-se as seções empilhadas correspondentes a cada modelo geológico proposto.

Aplicou-se nestas seções o método de migração f-k, do programa "sumigps". A escolha desta técnica de migração deveu-se ao fato de que em casos de velocidade constante, esta é a melhor técnica de migração disponível, além de seu menor tempo de processamento.

Na Primeira Etapa estabeleceu-se um h equivalente a 4,7m de altura, e ângulos iguais a 69° (modelo A) e 40° (modelo B). Os modelos sintéticos, de estrutura simples, e suas respectivas seções não-migradas e migradas estão ilustrados, respectivamente, nas Figuras 5, 6 e 7(modelo A), e nas Figuras 8, 9 e 10 (modelo B).

Para melhor avaliar os efeitos da aplicação do método de migração nos dados, efetuou-se leituras dos tempos de reflexão nas seções não-migrada e migrada do Modelo A nos intervalos de 40-45m, 45-50m e 50-55m das coordenadas horizontais (estaqueamento). A seguir calculou-se o ângulo θ entre a reta que melhor continha esses valores e a vertical.

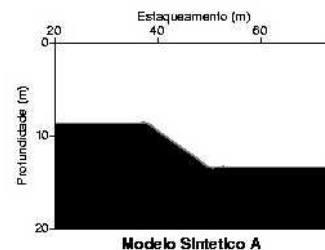


Figura 5. Modelo A de estrutura geológica simples ($h=4,7m \theta=69^\circ$)

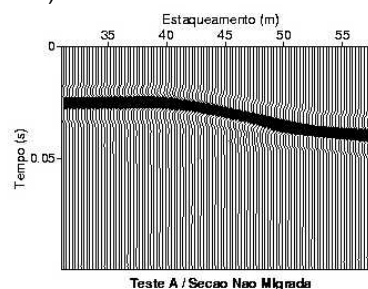


Figura 6. Seção sísmica não migrada obtida a partir do modelo A.

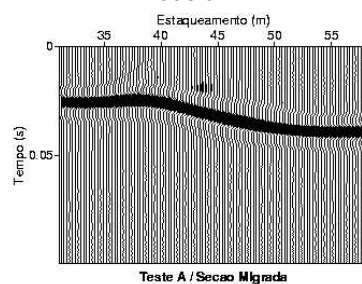


Figura 7. Seção sísmica migrada obtida a partir do modelo A.

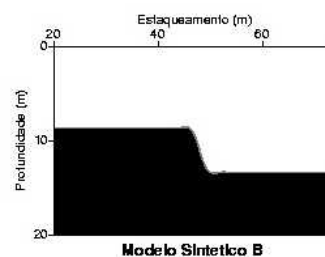


Figura 8. Modelo B de estrutura geológica simples ($h=4,7m \theta=40^\circ$)

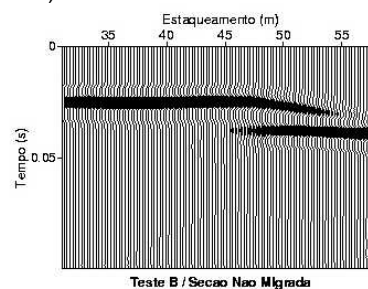


Figura 9. Seção sísmica não migrada obtida a partir do modelo B.

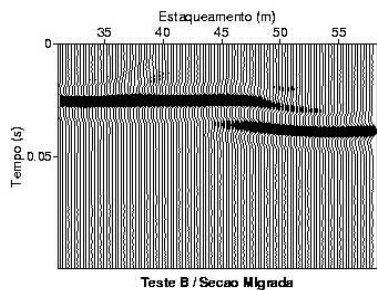


Figura 10. Seção sísmica migrada obtida a partir do modelo B.

Comparando esses valores (das seções não-migrada e migrada), nota-se que houve uma considerável mudança em θ (Tabela 1 e Figura 11).

Tabela 1. Ângulos de inclinação θ referentes aos intervalos das seções sísmicas não-migradas e migradas do Modelo A.

Intervalo do Estaqueamento (m)	Ângulo θ	
	Seção Não - Migrada	Seção Migrada
40 - 45	75°	69°
45 - 50	80°	73°
50 - 55	79°	84°

A segunda etapa simulou o mesmo modelo geológico obtido através da sísmica de refração (Figura 3). O modelo proposto de estrutura complexa, bem como suas respectivas seções não-migrada e migrada estão ilustrados nas Figuras 12, 13 e 14.

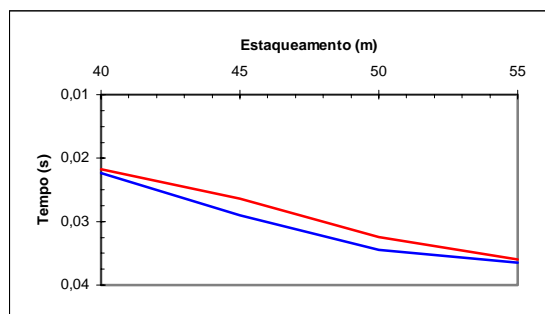


Figura 11. Representação gráfica da diferença de inclinação após a migração. Dados não-migrados (vermelho). Dados migrados (azul).

A rotina "triseis" acrescentou figuras de difração ao gerar os traços sísmicos. Esses sinais são de maior amplitude e possuem um pulso mais largo em relação ao sinal do refletor. A seção pós-migração, evidenciou essas figuras de difração e atenuou os eventos de interesse.

III) Sísmica de Reflexão

Na aquisição foi empregada a técnica CMP (*Common Mid Point*), na qual diversos pares fonte-receptor de diferentes registros, mas que "iluminam" o mesmo ponto comum em subsuperfície, são reagrupados em um conjunto comum, aumentando assim a razão sinal-ruído.

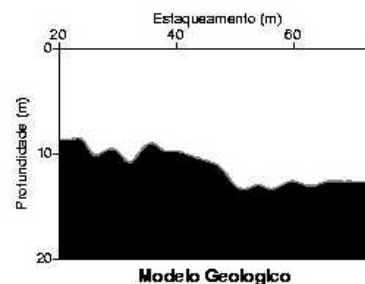


Figura 12. Modelo de estrutura geológica complexa, obtido pelo método de sísmica de refração.

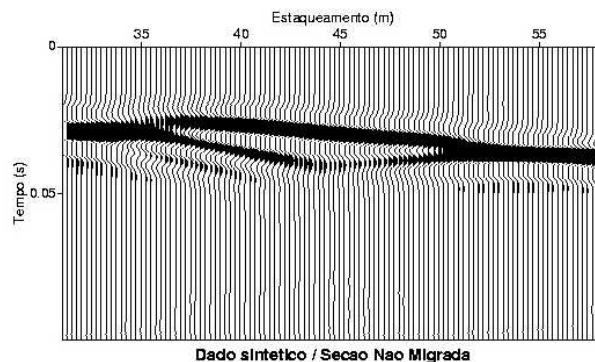


Figura 13. Seção sísmica não migrada obtida a partir do modelo geológico (Figura 12).

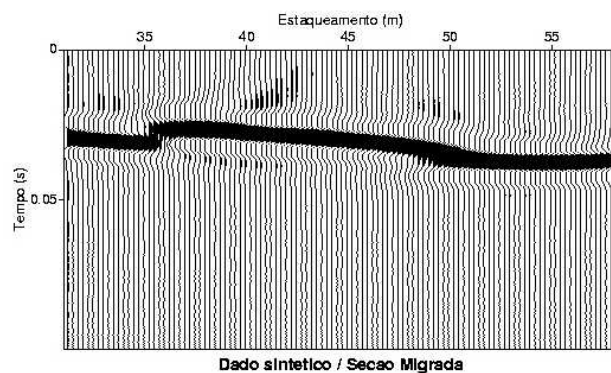


Figura 14. Seção sísmica migrada obtida a partir do modelo geológico (Figura 12).

Neste trabalho, adotou-se intervalo de receptores de 0,5m e *offset* mínimo de 12,5m (definidos a partir da pseudo análise de ruídos feita numa etapa anterior). A cada aquisição, movia-se a fonte de 0,5m e deslocava-se o primeiro receptor para a última posição. Obteve-se assim, uma multiplicidade de 1200%.

Uma vez feita a correção de NMO, pode-se aplicar o empilhamento.

As Figuras 15 e 16 ilustram, respectivamente, a seção sísmica empilhada não-migrada e a seção sísmica empilhada migrada.

Analisando as seções das Figuras 15 e 16, nota-se que o processo de migração foi imprescindível para uma melhora do dado sísmico. Embora tenha suavizado os eventos iniciais da interface até o estaqueamento de 38m e ter invertido a forma dos eventos das posições de aproximadamente 40, 45 e 50m (regiões onde o evento

sísmico indica depressões após a migração aparenta cumes, e vice-versa), a seção migrada apresenta uma interface mais condizente com o modelo geológico proposto.

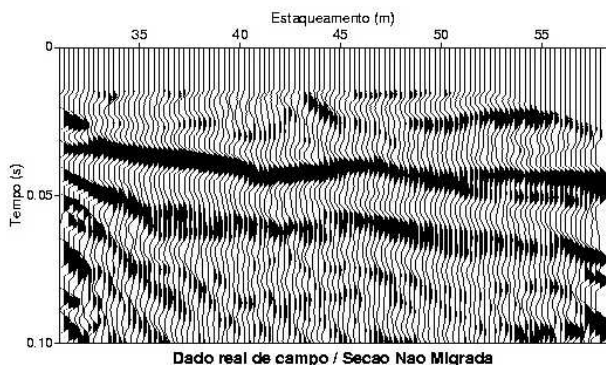


Figura 15. Seção sísmica não-migrada obtida a partir do método de reflexão sísmica.

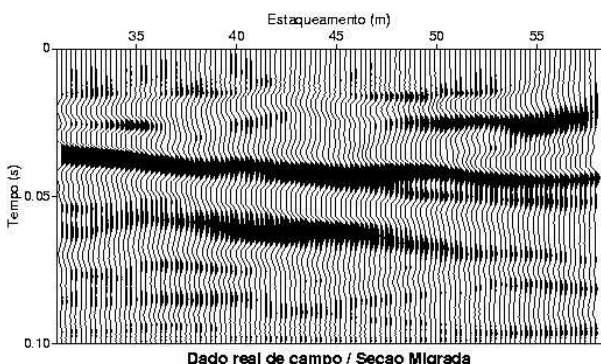


Figura 16. Seção sísmica migrada obtida a partir do método de reflexão sísmica.

IV) GPR

Neste trabalho, para a aquisição CMP, foram utilizados intervalos de deslocamento de 0,1 m e 0,2 m para as antenas de 100 e 50MHz, respectivamente. Para o arranjo CO foi utilizado *offset* de um metro e deslocamento de 0,2m para a antena de 100MHz e *offset* de dois metros e deslocamento de 0,5m para a antena de 50MHz.

Na Figura 17 é apresentada a seção *common-offset* obtidas com o GPR utilizando as antenas de 100MHz.

A forte absorção do sinal, provavelmente devido ao conteúdo de argila do estrato superficial, não permitiu o mapeamento das feições rasas de subsuperfície. Não foram, portanto, objeto do estudo de migração, apenas utilizou-se filtro digital tipo passa-banda trapezoidal de fase zero, com uma janela de suavização (*tapered window*) dada pela função seno (programa "sufilter") e ganho AGC do programa "sugain".

Nota-se na seção, uma hipérbole causada pela interferência de um poste da rede elétrica localizado a aproximadamente 10m da linha geofísica.

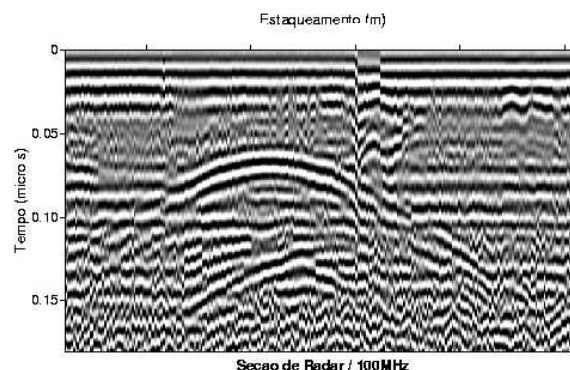


Figura 17. Seção de GPR. Antena de 100 MHz.

Conclusões

Neste trabalho, aplicou-se somente o método de migração f-k (programa "sumigps"), por ser a melhor técnica de migração disponível em casos de velocidade constante, e pelo seu menor tempo de processamento.

Os dados sintéticos permitiram avaliar os efeitos da técnica de migração para modelos geológicos com estruturas rasas em diferentes situações de mergulho.

Para os gradientes $h=4,7m$ e $\theta=69^\circ$ (modelo A) observou-se que o processo de migração reposicionou significativamente a interface sísmica, porém não resolveu as fortes difrações geradas quando o mergulho era mais acentuado ($\theta=40^\circ$, modelo B).

A rotina "triseis" acrescentou figuras de difração ao gerar os traços sísmicos do modelo B, e principalmente do modelo geológico de estruturas complexas (Figura 12), onde tais figuras de difração são de maior amplitude e possuem um pulso mais largo em relação ao sinal do refletor. A seção pós-migração, evidenciou essas figuras e atenuou os eventos de interesse.

Apesar de Black et al (1994), concluírem que os efeitos da migração em imagens de reflexão sísmica com alvos muito rasos (5 – 15m), são insignificantes na seção sísmica migrada, mesmo naquelas com mergulhos aparente elevados, o presente estudo, empregando dados reais de sísmica de reflexão, pôde concluir pela necessidade da aplicação das técnicas de migração em estruturas rasas complexas. Pela análise das seções das Figuras 15 e 16, nota-se que o processo de migração foi importante para uma melhora do dado sísmico, pois a seção migrada apresentou uma interface mais condizente com a geologia presente (Figura 12).

É importante salientar, porém, que Black et al. (1994), levaram em consideração a variação lateral de velocidade e o exagero vertical das seções. O mesmo não ocorre nas seções de dados reais deste trabalho, uma vez que não há variação lateral de velocidade, e descartou-se o exagero vertical.

Buscar-se-á em projetos futuros, avaliar a eficiência de outras rotinas de geração de traços sintéticos existentes no pacote SU, bem como a "manipulação" das demais técnicas de migração (Kirchhoff e diferenças finitas).

Referências

BLACK, R., STEEPLES, D.W., MILLER, R.D., "Migration of shallow seismic reflection data". *Geophysics*, v.59, n.3, p.402-410, 1994.

COHEN and STOCHELL. "Seismic Unix". Colorado School of Mines, 2002.

DAVIS, J.L., ANNAN, A.P. Ground-penetrating radar for high-resolution mapping of soil and rock stratigraphy. *Geophysical Prospecting*, v.37, p.531-551, 1989.

GOODMAN, D. Ground-penetrating radar simulation in engineering and archaeology. *Geophysics*, v.59, n.2, p.224-232, 1994.

MORAES, J.W.O., BOTELHO, M.A.B. Processamento CMP de Dados de Radar (GPR) no Detalhamento da Subsuperfície. *V Congresso Internacional da SBGf*, v.1, p.519-522, 1997.

PRADO, R.L., "A Sísmica de Reflexão Rasa e o Radar de Penetração no Solo na Investigação Geológico-Geotécnica em Ambientes Urbanos. Um Estudo na Cidade de São Paulo-SP, Brasil" Tese de Doutorado, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Unesp, 2000.

RICCOMINI, C. O rift continental do sudeste do Brasil. São Paulo, 1989. 256 p. Tese (Doutorado em Geociências). Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.

STEEPLES, D.W., MILLER, R.D. Avoiding pitfalls in shallow seismic reflection surveys. *Geophysics*, v.63, n.4, p.1213-1224, 1998.