



Emprego do método GPR e da migração reversa no tempo (RTM) na compreensão e solução de problemas geotécnicos

Ronald Ramos Alves* (CPGG/IGEO/UFBA) e Marco Antônio B. Botelho (CPGG/IGEO/UFBA)

Copyright 2015, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica.

This paper was prepared for presentation at the 14th International Congress of the Brazilian Geophysical Society, held in Rio de Janeiro, Brazil, August 3-6, 2015.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 14th 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

We show two examples of joint applications of GPR and Reverse Time Migration in (RTM) to provide accurate subsurface images. In the first, is made a velocity analysis through successive migrations. This velocity analysis can be used to locate and to infer the depth of buried pipelines. In the second example, is the use of RTM to delineate the reflectors, determining the thicknesses of layers, and giving the right positions and shapes of voids in the massive outcropping calcareous.

Resumo

Mostramos dois exemplos de aplicações conjuntas do GPR e da Migração Reversa no Tempo (RTM) para fornecer imagens precisas da subsuperfície. No primeiro deles, é feito um estudo de velocidade através de sucessivas migrações. Tal estudo de velocidade foi utilizado para localizar e inferir a profundidade de dutos enterrados. No segundo exemplo, a migração RTM foi utilizada para determinar a melhor velocidade de colapso das hipérboles, e assim delinear os refletores, definir as espessuras das camadas e localizar a existência de vazios, suas posições espaciais e a dimensão destes dentro do maciço de calcário aflorante.

Introdução

O Radar de Penetração no Solo (GPR) é uma técnica geofísica não invasiva que utiliza ondas eletromagnéticas para a investigação da subsuperfície. Nos últimos 15-20 anos, o desenvolvimento da aplicação desta técnica cresceu rapidamente, havendo um grande progresso no desenvolvimento da teoria e tecnologia. Assim, o GPR tornou-se um valioso método utilizado por cientistas, pesquisadores, engenheiros, consultores e estudantes universitários em muitas situações. No campo da engenharia geotécnica, uma das aplicações é detectar e inferir a profundidade de dutos e tubulações enterradas.

Além desta, as aplicações do GPR incluem estudos de contaminação de água subterrânea, sedimentologia, glaciologia e arqueologia. O método GPR tem inspirado novas áreas interdisciplinares de pesquisa tanto na academia quanto na indústria.

Atualmente ele é bem aplicado numa grande diversidade

de materiais tais como madeira, concreto e asfalto. Entre as diversas vantagens desta técnica podemos citar o seu custo relativamente baixo, a sua alta precisão, rapidez, produção de perfis com comprimentos variando desde centímetros a quilômetros e ainda que ele é um método não destrutivo.

O advento de uma técnica de processamento denominada migração permitiu aproximar a seção sísmica do modelo geológico da subsuperfície, desfazendo os efeitos da propagação das ondas sísmicas. O trabalho pioneiro é o de Hagedoorn (1954), o qual introduziu o uso das curvas padrões de frentes de onda e de difrações, que possibilitou a realização da migração manual dos dados sísmicos. Posteriormente, na década de setenta, Jon Claerbout e seus colaboradores da Universidade de Stanford, desenvolveram um método utilizando operadores de diferenças finitas capaz de realizar a migração dos dados sísmicos.

Este trabalho aplica a equação acústica da onda em dados GPR, considerando que estamos lidando com meios eletricamente resistivos, como rochas carbonáticas e solos arenosos. A migração RTM que aqui empregamos, usa o conceito do refletor explosivo, que foi apresentado por Loewenthal et al. (1976), assim, podemos migrar seções empilhadas, seções de afastamento nulo e seções com afastamento constante, sendo estas últimas o caso das seções de radar levantadas neste trabalho.

Existem muitas técnicas de migração, porém vale a pena citar Loewenthal and Mufti (1983) e Baysal et al. (1983) por serem pioneiros na utilização do método RTM. Existe ainda o trabalho de Botelho e Pestana (1997) que migra dados de GPR com RTM e realizando simultaneamente a correção topográfica nos dados.

O GPR

O Radar de Penetração no Solo (GPR) é uma técnica geofísica relativamente nova. O GPR usa ondas eletromagnéticas para sondar materiais com perdas dielétricas, e com isso, detectar estruturas e variações nas propriedades dos materiais (Davis and Annan, 1989). Mais comumente, as medidas com o GPR são obtidas dispendo-se as antenas transmissora e receptoras com uma separação fixa, e o conjunto é movido sobre a superfície do terreno, com o objetivo de detectar reflexões oriundas da subsuperfície.

A técnica do GPR é similar ao princípio da reflexão sísmica e à técnica do sonar. O radar produz pequenos pulsos de energia eletromagnética de alta frequência (10-1000 MHz), a qual é transmitida ao solo. A propagação do sinal de GPR depende das propriedades elétricas do solo sob altas frequências, principalmente da condutividade elétrica e da

permissividade dielétrica.

Um sistema de GPR inclui um gerador de sinal e antenas receptora e transmissora, assim como um módulo de armazenamento dos dados que pode ser um disco rígido, um pen drive ou mesmo uma saída gráfica. Alguns sistemas avançados têm um computador conectado, o qual facilita o processamento dos dados enquanto se está adquirindo os dados no campo, e após o seu registro.

A RTM

A RTM realiza a migração da seção sísmica empilhada (correspondente à seção de afastamento nulo), a qual corresponde ao campo de ondas registrado na superfície pelos geofones. A seção é retropropagada, iniciando com o tempo máximo, ou seja, a última linha da matriz $(x, z, t = \tau_{max})$, terminando com a primeira linha da matriz $(x, z, t = 1)$.

Equação da onda

A equação bidimensional da onda Eq. (1) é uma equação diferencial parcial linear de segunda ordem que possui duas soluções independentes, ou melhor, dois campos contínuos no espaço e no tempo, que são os campos de pressão e da velocidade da partícula. O campo de pressão é representado por um campo escalar, ao passo que o campo da velocidade da partícula é representado por um campo vetorial. Para obtermos a equação da onda, recorreremos às leis de Newton e de Hooke, as quais relacionam a pressão e a velocidade.

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 P}{\partial t^2}. \quad (1)$$

Modelo do refletor explosivo

O modelo do refletor explosivo foi proposto no trabalho de Loewenthal et al., (1976). Eles propuseram um modelo capaz de simular, com exceção das múltiplas, uma seção empilhada a partir de um único experimento físico. Este modelo surgiu da necessidade da utilização da solução da equação da onda nas técnicas de migração em seções sísmicas empilhadas.

Supondo que os raios em uma seção de afastamento nulo (ou empilhada) percorrem caminhos iguais quando viajam da fonte para o refletor e do refletor de volta a fonte ou receptor, o modelo do refletor explosivo considera as fontes não mais posicionadas na superfície junto aos receptores, mas os posiciona sobre as interfaces onde são detonadas simultaneamente no tempo $t = 0$, permanecendo os receptores na superfície. Desse modo, para que a seção final registrada corresponda a seção empilhada, de afastamento fonte-receptor constante e igual a zero, duas condições devem ser satisfeitas:

- As amplitudes das fontes nos refletores sejam proporcionais aos coeficientes de reflexão da determinada interface;
- As velocidades intervalares utilizadas para a propagação sejam iguais à metade das velocidades reais.

Assim, o campo de ondas registrado na superfície pode ser representado por $P(x, z = 0, \tau)$, em que τ é o tempo

duplo de percurso da fonte à interface, isto é, $\tau = 2t$, onde t é o tempo gasto da fonte ao refletor. Com estas considerações atendidas, pode-se utilizar a equação da onda para descrever a propagação dos campos em superfície.

Operadores de diferenças finitas

Neste trabalho, utiliza-se aproximações da solução da equação bidimensional da onda (Eq. 1), obtida através de manipulações algébricas da série de Taylor, para os operadores de quarta ordem para as derivadas parciais em relação a x e z e de segunda ordem para a derivada parcial em relação ao tempo. Substituindo as variáveis (x, z, t) na equação bidimensional da onda pelas variáveis discretas $(m\Delta x, j\Delta z, n\Delta t)$, o campo de pressão pode ser representado por:

$$P(x, z, t) = P(m\Delta x, j\Delta z, n\Delta t) \quad (2)$$

e por comodidade, podemos simplificar a notação e escrever o campo de pressão como $P_{m,j}^n$. Dessa forma, combinando os operadores de quarta ordem para as derivadas parciais em relação a x e a z e o operador de segunda ordem para a derivada em relação ao tempo com a equação bidimensional da onda, encontramos uma equação para a extrapolação do campo de onda:

$$P_{m,j}^{n+1} = \{2 - 2,5(A_x + A_z)\}P_{m,j}^n - P_{m,j}^{n-1} + \frac{A_x}{12} \{16(P_{m-1,j}^n + P_{m+1,j}^n) - (P_{m-2,j}^n + P_{m+2,j}^n)\} + \frac{A_z}{12} \{16(P_{m,j-1}^n + P_{m,j+1}^n) - (P_{m,j-2}^n + P_{m,j+2}^n)\}, \quad (3)$$

$$\text{em que } A_x = \frac{(c\Delta t)^2}{(\Delta x)^2} \quad \text{e} \quad A_z = \frac{(c\Delta t)^2}{(\Delta z)^2}.$$

Portanto, utilizando a Eq. (3), podemos calcular o valor do campo de pressão para um tempo $t + \Delta t$, a partir dos valores do campo em t e em $t - \Delta t$.

Os limites dos modelos introduzem reflexões indesejáveis nas bordas, que podem ser atenuadas com a criação de uma zona chamada de borda de absorção. Uma maneira de se evitar tais ruídos foi apresentada por Kosloff & Reshef (1983) e utilizada por Loewenthal et al. (1991), que consiste em colocar nas malhas próximas das bordas uma função de atenuação, que age sobre os campos de ondas que se propagam dentro destas faixas limites.

A solução da equação da onda através de operadores de diferenças finitas é um processo estável dentro de certos limites. O trabalho de Faria (1986), mostrou que a velocidade de propagação do meio, o intervalo de amostragem em tempo e os espaçamentos entre os pontos da malha, associados através dos parâmetros A_x e A_z , são os fatores responsáveis por estabelecer as condições de estabilidade do processo. Quando a equação bidimensional da onda é solucionada por meio de operadores de diferenças finitas de quarta ordem para as derivadas espaciais e de segunda ordem para a derivada em relação ao tempo, o limite de estabilidade é dado pela inequação $A_x + A_z \leq 3/4$.

Associado ao método de diferenças finitas também está o problema de dispersão numérica. De acordo com o mesmo trabalho, as velocidades de fase e de grupo, quando a propagação se faz através de métodos

numéricos, passam a ser função do espaçamento entre os pontos da malha utilizada, da frequência do sinal e do ângulo de propagação. O estudo deste problema, mostrou que a equação da onda resolvida por operadores de diferenças finitas de quarta ordem produzem menos dispersão que se resolvida por operadores de segunda ordem. E se considerarmos que variações da ordem de 1% nas velocidades não causam dispersão nos dados, podemos adotar as seguintes relações para a aproximação de quarta ordem da equação da onda:

$$G_z = \frac{2\pi}{\Delta z k \cos \theta} > 5 \quad \text{e} \quad G_x = \frac{2\pi}{\Delta x k \sin \theta} > 5 \quad (4)$$

ou

$$G_z = \frac{v}{\Delta z f \cos \theta} > 5 \quad \text{e} \quad G_x = \frac{v}{\Delta x f \sin \theta} > 5, \quad (5)$$

em que θ corresponde ao ângulo de propagação em relação ao eixo z , k corresponde ao número de onda e f é a frequência máxima corretamente migrada.

Estudo de velocidade para localização de tubulações enterradas

No primeiro caso, empregamos a técnica geofísica do Radar de Penetração no Solo (Ground Penetrating Radar) ou GPR para detectar e inferir a profundidade de dutos enterrados ao longo de uma dutovia. A aquisição dos dados foi realizada com um equipamento da Mala Geoscience, modelo Ramac I, acoplado com uma antena de 200 MHz e em arranjo do tipo afastamento constante. Os perfis foram orientados paralelamente às margens do Rio Quiricó, ou melhor, perpendicularmente ao gasoduto que se desejava imagear. Por questões de espaço e qualidade das respostas (radargramas), selecionou-se o **perfil 4a** (distante 30 m do rio) para mostrar o estudo de velocidade através da migração RTM, a qual é a última etapa do processamento dos dados de GPR. Com a migração é feita a correção dos efeitos da geometria de levantamento dos dados e da distribuição espacial da energia. Idealmente, as hipérbolas de difração são colapsadas à uma fonte pontual e os refletores inclinados e/ou curvos reposicionados em suas corretas localizações e com suas reais dimensões. Em nosso estudo, a migração foi utilizada como uma ferramenta para estimar a velocidade de propagação do pulso eletromagnético no solo acima do tubo, cujos resultados foram comparados com a técnica de ajuste de hipérbolas. O campo de velocidades obtido é usado para a conversão da seção em profundidade. Sendo assim, o perfil 4a, que pode ser visto na Fig. (1), foi migrado com metade da velocidade média constante (0,09675 m/ns) determinada durante a análise de velocidade e conversão da seção em profundidade e o resultado pode ser visto na Fig. (2).

Nota-se que as três primeiras (da esquerda para a direita) hipérbolas foram totalmente colapsadas, o que confirma a nossa interpretação anterior. Em relação à quarta hipérbole, podemos perceber que ela foi parcialmente colapsada e isto nos diz que a velocidade naquela porção do terreno deve ser maior do que o valor utilizado na migração (variação lateral de velocidade). De fato, aplicando novamente a migração com a velocidade igual a metade de 0,113 m/ns, percebemos o colapso da quarta hipérbole, ao passo que as outras três foram invertidas

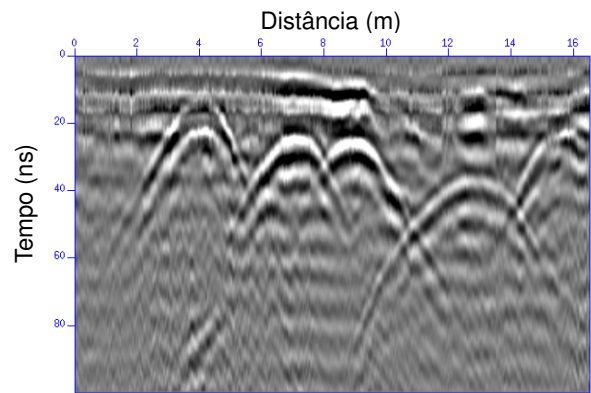


Figura 1: Perfil 4a obtido às margens do Rio Quiricó.

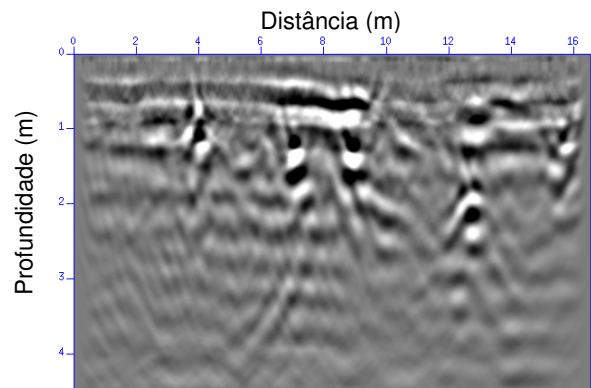


Figura 2: Perfil 4a com a aplicação da migração RTM ($v=0,048375$ m/ns).

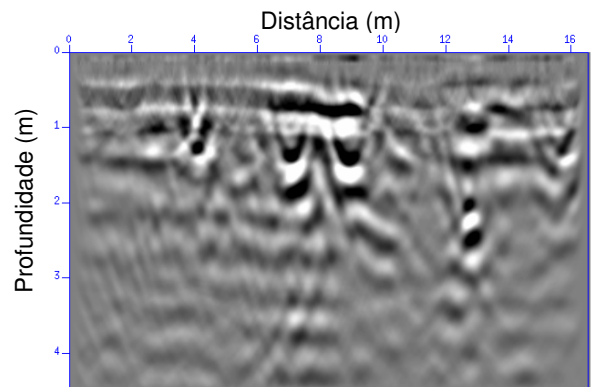


Figura 3: Perfil 4a com a aplicação da migração RTM ($v=0,0565$ m/ns).

(“sorrisos” de migração). A seção migrada com este último valor para a velocidade pode ser vista na Fig. (3).

Diante da análise dos radargramas presentes nas Figs. (2) e (3), podemos criar um campo de velocidades $V(x,t)$ e migrar a seção de tal forma que todas as hipérbolas de difração sejam colapsadas simultaneamente. O campo de velocidades utilizado na migração RTM e a seção migrada podem ser vistos nas Figs. (4) e (5).

Os dutos são identificados através das hipérbolas de difração presentes no radargrama, levando em consideração que os pontos difratores estão localizados

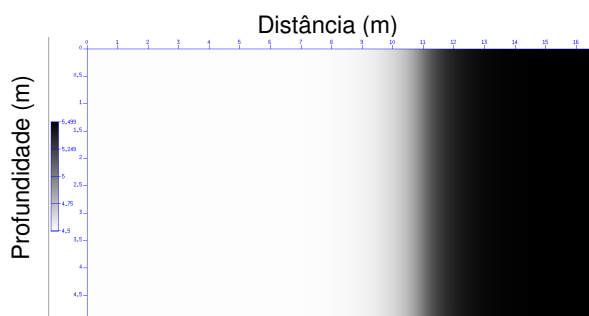


Figura 4: Campo de velocidades utilizado na migração RTM.

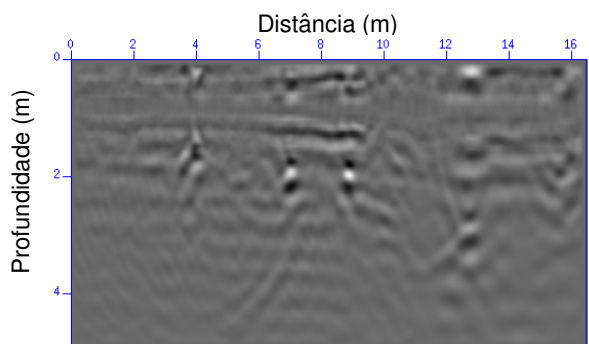


Figura 5: Perfil 4a com a aplicação da migração RTM.

nos vértices dessas hipérbolas, isto é, a posição da geratriz superior dos dutos. Assim, foi possível localizar os dutos e o resultado é mostrado na Tab. (1).

	DUTO 1	DUTO 2	DUTO 3	DUTO 4
Prof. (m)	0,9	1,4	1,41	2,02
Dist. (m)	4,1	7,1	8,9	12,7

Tabela 1: Tabela que mostra a localização dos dutos com a profundidade e a distância ao início do perfil.

Detecção de Vazios em Calcário

No segundo caso, empregamos a técnica geofísica do GPR para investigar a integridade do maciço calcário aflorante, ou seja, detectar a possível presença de vazios, fraturas, planos de acamamento ou cavernas na área onde pretende-se implantar uma frente de lavra ou realizar alguma construção civil.

O emprego do GPR na detecção de vazios em rochas carbonáticas é uma das aplicações clássicas do método, pois as ondas eletromagnéticas atravessam o carbonato e vão refletir no topo dos espaços vazios situados dentro do corpo de rocha. No caso de superfícies irregulares ou de pequenos vazios isolados na rocha, cujo raio de curvatura é menor ou igual ao comprimento de onda na rocha carbonática, aparecem nos radargramas como eventos na forma de hipérbolas. Superfícies planas ou suaves sub-horizontais vão gerar refletores contínuos que aparecem nas seções 2D de radar.

O objetivo deste trabalho, como dito acima, é investigar a integridade da rocha calcária na área, localizando as interfaces ou contatos entre as camadas e delimitar os



Figura 6: Vista da área com a trajetória do perfil GPR-01, investigando a subsuperfície do maciço onde uma empresa tenciona implantar futura lavra de blocos de rochas ornamentais.

locais com muitos vazios. Ou seja, devemos ter a certeza que a área a ser lavrada não está posicionada sobre zona de cavernas ou mesmo de zonas com concentração de vazios, o que prejudicaria a integridade e/ou a qualidade dos blocos ornamentais que serão futuramente extraídos. Assim, pretende-se evitar a lavra em locais onde o material com muitos vazios provoque o descarte dos blocos, contribuindo para economizar tempo e dinheiro, e consequentemente, evitar a destruição do meio ambiente. O mapeamento de possíveis cavernas também evitará possíveis acidentes associados ao colapso de estruturas que possam ser construídas sobre elas, tais como estações de bombeamento, barragens ou mesmo da frente de lavra, evitando ainda a destruição do sistema de cavernas naturais que possam existir na área, preservando o patrimônio natural.



Figura 7: Sistema SIR-II da GSSI utilizado na aquisição com uma antena de 200 MHz.

A aquisição dos dados foi realizado com um equipamento da GSSI, modelo SIR-II, acoplado com uma antena de 200 MHz e em arranjo do tipo afastamento constante. Vide Figura 7, as sondagens (ou scans) são ajustadas para serem realizadas a cada 0,2 metros, ao longo do perfil. A justaposição dos scans forma a seção GPR representativa da subsuperfície, conforme a Fig. (8).

Analisando a seção de radar oriunda do perfil levantado sobre o maciço, podemos observar que:

1. Existe uma primeira capa de rocha com 2,5 a 2,8 m de espessura e aspecto homogêneo, propícia para extração de blocos;

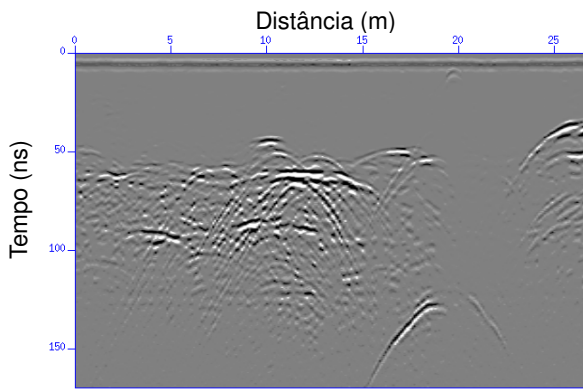


Figura 8: Seção referente ao perfil GPR-01, registrada em tempo.

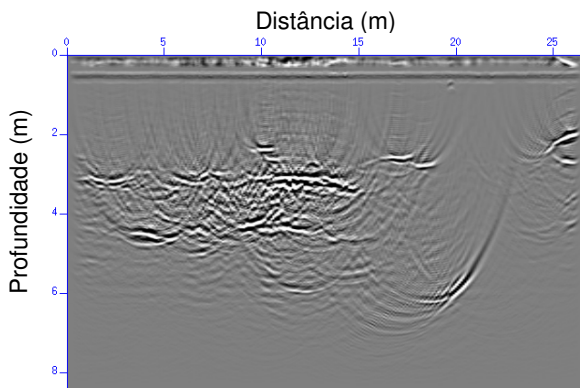


Figura 9: Seção referente ao perfil GPR-01, com a aplicação da migração RTM ($v=0,045$ m/ns).



Figura 10: Foto de um vazio na superfície do maciço de calcário nas proximidades do perfil GPR-01. Projetando um eixo na direção de maior comprimento desse vazio, foi visto em campo, que tal eixo faria um ângulo aproximadamente reto com a direção do perfil na posição de 20 metros.

- Há um segundo pacote de rochas entre duas superfícies cheias de vazios, nas profundidades de 3,0 e 4,5 m de profundidade. Esta camada com 1,5 m de espessura tem um aspecto cheio de pequenos refletores e pontos de difração, indicando um material cheio de vazios e, portanto, inapropriado para geração de blocos comerciais;
- O pacote abaixo de 5,0 m tem menos vazios pois tem um aspecto mais homogêneo, indicativo de material

apropriado para lavra;

- Na distância de 20 m na seção GPR existe a indicação de um vazio que está na profundidade de 6,0 m (veja a grande hipérbole), o qual parece ter continuidade até a superfície (vide a pequena hipérbole na superfície e as hipérbolas intermediárias).

Acreditamos que o apagão abaixo da posição 20 m se deva a presença de argila úmida preenchendo os vazios que se interconectam até a superfície. A Fig. (10) mostra um destes vazios que chegam a superfície e estão conectados a outros.

A pequena hipérbole superficial deve estar relacionada com as hipérbolas intermediárias mais abaixo, e por fim com o vazio maior indicado pela grande hipérbole ao fundo.

Vale ressaltar que estamos interpretando uma seção GPR de afastamento constante, a qual é uma aproximação de uma seção de afastamento nulo e, ambas, são geradas pela propagação da onda em subsuperfície.

A migração da seção GPR mostrada na Fig. (8) é apresentada na Fig. (9), considerando a velocidade $v = 0,09$ m/ns de propagação do pulso eletromagnético na rocha carbonática. Observe que ocorre o colapso perfeito da perna esquerda da hipérbole profunda ($z=6$ m), indicando que a velocidade do pulso que atravessa o pacote de rocha é 0,09 m/ns.

A seção migrada com RTM também revela as duas interfaces ou contatos a 3,0 e 4,5 m de profundidade; podemos agora ver melhor, ou seja, sem difrações, que o material entre estas interfaces apresenta muitas feições associadas a pequenas reflexões descontínuas, continuando a indicar um material carregado de vazios, portanto, inapropriado para extração de material como rocha ornamental. Os pontos difratores abaixo da posição 20 m podem indicar vazios orientados de modo sub-vertical nesta posição.

Cabe ainda mencionar que foram realizadas sucessivas migrações para a determinação da melhor velocidade de colapso das hipérbolas de difração e, também, que melhor imageavam os dois refletores (em torno de 3 e 4,5 m). A menor velocidade testada na migração foi igual a $v = 0,03$ m/ns e a maior foi igual a $v = 0,06$ m/ns. As seções migradas com estes valores para as velocidades podem ser vistas nas Figs. (11) e (12). Vale a pena observar o colapso da perna direita da hipérbole sob a chaminé ou poço de argila e a migração incompleta da perna esquerda. Estas duas seções mostram que é muito importante que se faça o estudo das velocidades para que se possa realizar a conversão da seção em profundidade de forma coerente.

Conclusões

Neste trabalho, conseguimos mostrar dois exemplos de aplicações conjuntas do GPR e da migração reversa no tempo que permitem gerar imagens que auxiliam na compreensão e solução de problemas geotécnicos. No primeiro deles, foi realizado um estudo de velocidade através de sucessivas migrações. Esta análise de velocidade foi utilizada para localizar e inferir a profundidade de 4 dutos enterrados, os quais fazem

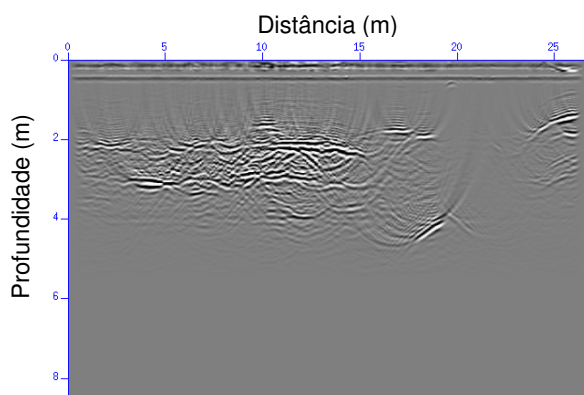


Figura 11: Seção referente ao perfil GPR-01, com a aplicação da migração RTM ($v=0,03$ m/ns).

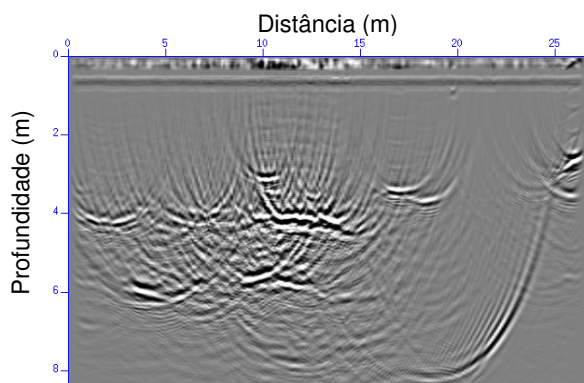


Figura 12: Seção referente ao perfil GPR-01, com a aplicação da migração RTM ($v=0,06$ m/ns).

parte de um gasoduto pertencente à Petrobras. No segundo exemplo, a migração RTM foi utilizada para determinar a melhor velocidade de colapso das hipérbolas, delineamento dos refletores, definição das espessuras das camadas e a presença de vazios no maciço de calcário aflorante. Analisando o colapso das hipérbolas foi possível determinar a velocidade correta de 0,09 m/ns para a rocha calcárea e de 0,06 m/ns para a argila que preenche os vazios.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CPGG/UFBA, pelo apoio no desenvolvimento deste trabalho.

Referências

- Baysal, E., Kosloff, D. D. and Sherwood, J. (1983) *Reverse time migration*, Geophysics, v. 48, pp. 1514-1524.
- Botelho, M.A.B. e Pestana, R. (1997) *Migração de dados de radar (GPR) com correção topográfica simultânea*, Rev. Bras. Geof. V. 15, N. 1, Março, São Paulo.
- Davis, J.L. and Annan, A.P. (1989) *Ground Penetrating radar for high-resolution mapping of soil and rock stratigraphy*, Geophysical Prospecting, Vol. 37, pp. 531-551.
- Faria, E. L. (1986) *Migração antes do empilhamento utilizando propagação reversa no tempo*, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal da Bahia.

French, W. S. (1975) *Computer migration of oblique seismic reflection profiles*, Geophysics, v. 40, pp. 961-980.

Hagedoorn, J. G. (1954) *A process of seismic reflection interpretation*, Geophysics, Prospect., v. 2, pp. 85-127.

Kosloff, D. D. and Reshef, M. (1983) *A general non reflecting boundary condition for discrete wave propagation algorithms*, Seismic Acoustic Laboratory report of Houston, v. 12, pp. 155-164.

Loewenthal, D., Lu, L., Robertson, R. and Sherwood, J.W. (1976) *The wave equation applied to migration*, Geophysics, Prospect., v. 24, pp. 380-399.

Loewenthal, D. and Mufti, J. R. (1983) *Reversed time migration in spatial frequency domain*, Geophysics, v. 48, pp. 627-635.

Loewenthal, D., Wang, C. J., Johnson, O. G. and Juhlin, C. (1991) *High order finite difference modeling and reverse time migration*, Exploration Geophysics 22(3) 533 - 545.