

## Simulação sísmica entre poços e tratamento tomográfico dos dados visando a caracterização geológica – geotécnica rasa

Celso José Costa Junior AeroGeoPhysica – LA, Brasil

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

A tomografia sísmica é uma ferramenta muito importante para imagear diferenças de propriedades físicas em subsuperfície. Uma boa distribuição dos raios é um fator muito importante para o sucesso dessa inversão. Um dos algoritmos mais conhecidos em tomografia é o SIRT. Este trabalho contém o desenvolvimento de um estudo sintético sobre tomografia sísmica de poço, usando o SIRT para fazer a inversão dos dados. Os modelos sintéticos são importantes para a geofísica, pois é possível realizar diversos testes auxiliando assim a prevenção de problemas que ocorrem com dados reais. Para que a simulação fosse o mais real possível foi escolhido um problema que ocorre em geologia, esse problema é o carste.

### Introdução

Motivados pelo sucesso da tomografia médica nos anos 80, geofísicos tem usado métodos análogos ao da tomografia médica para exploração de hidrocarbonetos, caracterização de reservatórios e engenharia de produção (Lo & Inderwiesen, 1994). Na sismologia a tomografia vem sendo usada para estudar a crosta e o manto superior utilizando-se, por exemplo, da distribuição da variação das velocidades nesses meios (McMechan, 1982).

A tomografia sísmica, essencialmente, é o método de inversão que envolve a construção da imagem de um meio através da distribuição e variação espacial da velocidade.

Para Clayton (1984) tomografia pode ser definida como a reconstrução de um campo de conhecimento através de uma integral de linha.

$$t = \int_{\text{raio}} s(x, z) dv$$

A primeira prática da tomografia foi na medicina. A técnica da tomografia radiológica consiste em disparar raios-x através da parte do corpo de interesse (figura 1).

Em 1917 um matemático australiano chamado Johann Randon provou o teorema chamado de teorema

de slice (Randon, 1917). Este teorema estabelece a possibilidade de reconstrução em 2D através de uma integral de linha 1D (Lee & Pereyra, 1993). Em 1963 Allen Cormack propôs um método para resolver o problema de imageamento radiológico (Cormack, 1963). Já em 1971 um engenheiro chamado Geoffrey Hounsfield fez um método para trabalhar com scanner de raios-x e um computador (Hounsfield, 1973), esse foi o início da tomografia computadorizada.

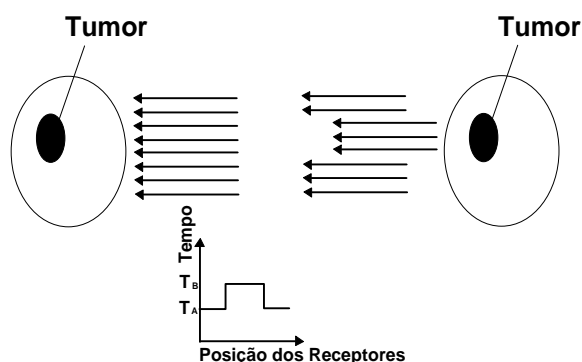


figura 1 – Representação de uma tomografia médica, onde é mostrada a atenuação dos raios-x.

### Metodologia

Os principais arranjos de tomografia sísmica de poço são, *cross-hole* (figura 2 a) e *hole-to-surface* (figura 2 b).

- crosshole*: neste arranjo os receptores estão localizados num poço e as fontes no outro poço;
- hole-to-surface*: neste arranjo os receptores estão localizados no poço e as fontes na superfície;

Utilizamos aqui a chamada tomografia de tempo de percurso. Neste caso, o parâmetro usado é a vagarosidade, “*slowness*” (Duarte, 1997), ou seja, o inverso da velocidade. Neste trabalho foi assumido que a célula é isotrópica e homogênea, já que a intenção deste trabalho não é discutir anisotropia.

A região entre os poços é dividida em pequenas células (figura 3) de dimensão estabelecida pelas condições de experimento (números de pontos de tiros), sendo que dentro de cada célula a velocidade é assumida como constante. A grandeza observada é o tempo de percurso da onda sísmica, com isso é possível determinar-se a vagarosidade. Como descrito a seguir:

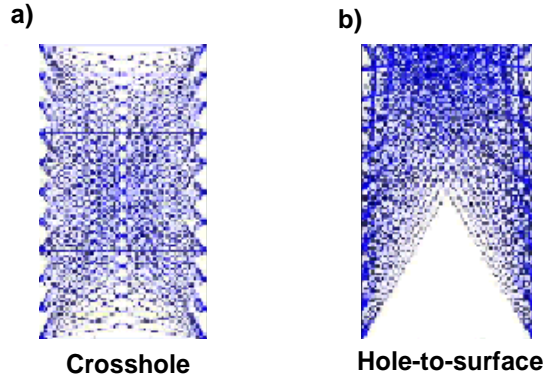


figura 2 – Geometria dos arranjos de tomografia sísmica de poço.

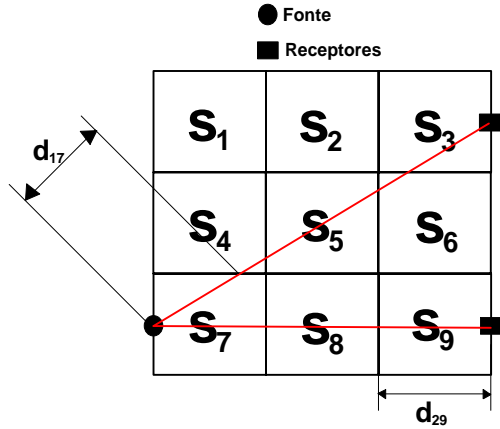


figura 3 – Representação da distribuição do meio estudado através de células.

$$v = \frac{d}{t} \quad (1)$$

$$v = \frac{1}{s} \quad (2)$$

assim:

$$t = d \cdot s \quad (3)$$

onde  $\mathbf{t}$  é o vetor tempo de percurso “travel-time” (Duarte, 1997) de comprimento  $\mathbf{N}$ ,  $\mathbf{d}$  é a matriz distância percorrida na célula  $ij$ ,  $\mathbf{s}$  é o vetor vagarosidade,  $\mathbf{N}$  é o numero total de raios,  $\mathbf{M}$  é o numero total de células,  $i$  é o numero do raio e  $j$  é o numero da célula.

$$\begin{pmatrix} d_{11} & d_{12} & \dots & d_{1j} \\ d_{21} & d_{22} & \dots & d_{2j} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ d_{i1} & d_{i2} & \dots & d_{ij} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} s_1 \\ s_2 \\ \dots \\ s_j \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} t_1 \\ t_2 \\ \dots \\ t_i \end{pmatrix} \quad (4)$$

$$t_i^{obs} = \sum_{j=1}^J s_j^{real} \cdot d_{ij} \quad (5)$$

para  $i = 1, \dots, I$

onde  $t_i^{obs}$  é a grandeza fornecida pelos dados obtidos pela leitura do sismograma (tempo de chegada da onda sísmica).

### Sirt

O algoritmo SIRT resolve indiretamente a equação (5), dando um resultado iterativo e eficiente. Esse método elimina o problema que seria inverter uma matriz muito grande ( $s = t \cdot d^{-1}$ ). Um modelo inicial é estimado para o vetor  $\mathbf{s}$  que é o “input” para o laço iterativo do algoritmo e serve como primeiro  $\mathbf{s}^{est}$  (vagarosidade estimada) para a solução real  $\mathbf{s}^{real}$  (vagarosidade real). Com essa vagarosidade estimada é gerado um modelo direto tendo como resultado  $\mathbf{t}^{cal}$  (tempo calculado).

$$t_i^{cal} = \sum_{j=1}^J d_{ij} \cdot s_j^{est} \quad (6)$$

para todos raios  $i = 1, \dots, I$

O próximo passo é comparar o  $t_i^{obs}$  com o  $t_i^{cal}$ , com a diferença dos dois é gerado um modelo atualizado.

$$\Delta s_j^i = d_{ij} \cdot \frac{t_i^{obs} - t_i^{cal}}{\sum_{j=1}^J d_{ij}} \quad (7)$$

$$\Delta s_j = \frac{1}{W_j} \cdot \sum_{i=1}^I \Delta s_j^i \quad (8)$$

para  $j = 1, \dots, J$

onde  $W_j$  é o número de raios que atravessa a célula “j”.

$$s_j^{(novo)est} = s_j^{est} + \Delta s_j \quad (9)$$

Este laço continua enquanto  $t_i^{obs} - t_i^{cal}$  não for menor que um valor de tolerância pré-determinado.

### Modelo geológico

O modelo geológico escolhido, carste (figura 4), contém uma camada de solo de espessura de 6 m e velocidade de onda sísmica de 450 m/s, se tratando de um solo areno argiloso. Abaixo dessa camada vem uma camada intermediaria com espessura de 15 m e velocidade de onda sísmica de 1500 m/s. A camada de metacalcário tem velocidade de onda sísmica de 3800 m/s, o modelo desse trabalho vai até a profundidade de 59 m, não alcançando assim a base do metacalcário. A área cárstica foi considerada como sendo um retângulo de 20x35 m. Foi considerado que as cavidades estão preenchidas por lama, e tem uma velocidade de onda sísmica de 2000 m/s.

Como o objetivo seria o de mapear as cavidades cársticas através de um ensaio *crosshole*, foi escolhido um datum de referência (figura 4) situado a dois metros acima do metacalcário a partir do qual se iniciaram os ensaios de tomografia (posição de fonte e receptores).

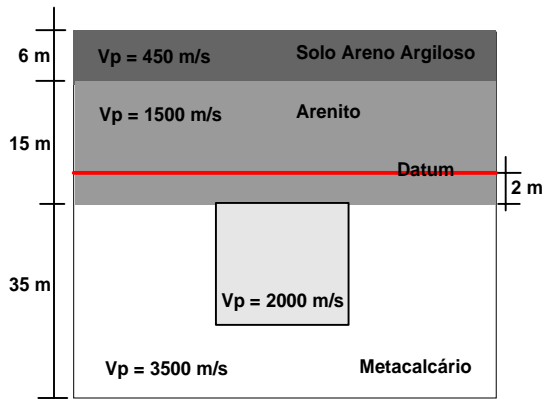


figura 4 – Modelo Geológico (Carste).

### Modelo Carste em fase inicial

Os três modelos apresentados nesse trabalho tiveram a mesma geometria de raios, *crosshole*, sendo que a primeira posição de fonte localizou-se na coordenada (0, 0.5) do modelo e a última posição de fonte na coordenada (0, 39.5), e o primeira posição do receptor esteve na coordenada (40, 0.5) e o última posição do receptor na coordenada (40, 39.5). O espaçamento entre as fontes e os receptores foi o mesmo, 1 m.

O modelo em fase inicial é apresentado abaixo (figura 5 a), ele tem uma camada superior com espessura de 2 m e velocidade de onda sísmica de 1.5 km/s (vagarosidade de 0.67 s/km), sotoposto tem-se o metacalcário com velocidade de 3.8 km/s (vagarosidade de 0.26 s/km), sendo que as cavidades cársticas preenchidas com lama apresentam velocidade de 2 km/s (vagarosidade de 0.5 s/km). As cavidades cársticas do modelo inicial (figura 5 a) apresentam, quase sempre, os tamanhos de 2x2 m e 3x3 m.

O resultado da inversão usando o algoritmo SIRT apresentou um resultado muito bom, nota-se que as cavidades e a camada superior de arenito, apresentadas pelo modelo (figura 5 a) foram bem identificadas pela inversão (figura 5 b).

### Modelo Carste em fase intermediária

O modelo intermediário difere do modelo em fase inicial pela maior quantidade de cavidades sendo que algumas já apresentam interligações (figura 6 a). Esse modelo reflete o processo dinâmico do carste, onde as cavidades tendem a aumentar de tamanho e outras cavidades são criadas.

O resultado do SIRT novamente apresentou um bom resultado, sendo que na figura 6 - b as cavidades cársticas são facilmente identificadas.

### Modelo Carste em fase final

O modelo cárstico em fase final é bastante importante para a geologia de engenharia, pois nessa fase pode ocorrer colapso da área situada acima da cavidade cárstica. Foi o que ocorreu na cidade de Cajamar (SP). A população de Cajamar presenciou o aparecimento de uma cratera com diâmetro aproximado de 10 m, onde destruiu o quintal de uma casa. A formação do buraco foi antecedida por ruídos descritos como explosões ou trovoadas longínquas (Teixeira, et al, 2001). E em um mês o buraco chegou a 29 m de diâmetro e 18 m de profundidade (figura 7).

Nesse modelo, fase final, a área retangular onde ocorre o carste é uma única cavidade, ou seja, as pequenas cavidades foram evoluindo e interligando-se uma com as outras.

Devido ao tamanho do corpo e pela sua geometria perpendicular aos poços, o SIRT não apresentou um bom resultado (figura 8 b), identificando bem apenas o arenito furnas.

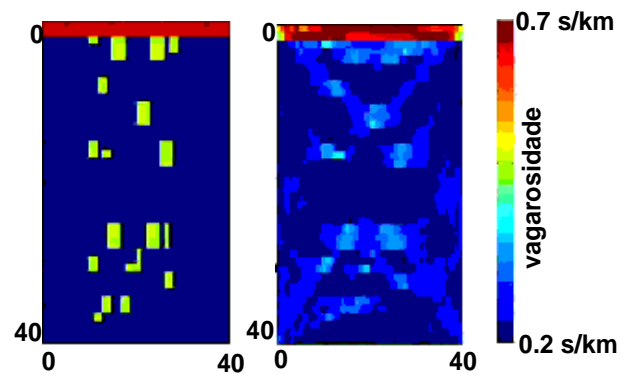


figura 5 – a) Modelo cárstico em fase inicial.  
b) Inversão sísmica do modelo inicial.

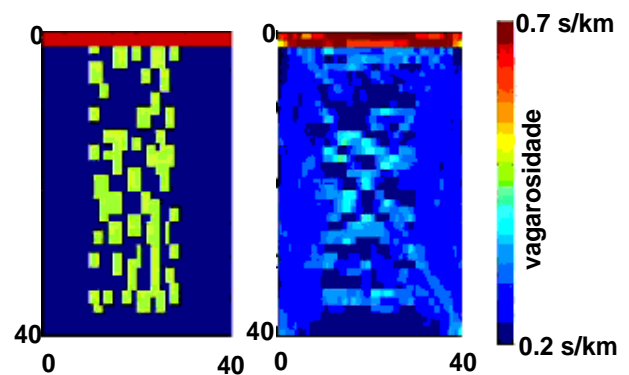


figura 6 – a) Modelo cárstico em fase intermediária.  
b) Inversão sísmica do modelo intermediário.



figura 7 – Acidente geológico cárstico ocorrido em Cajamar-SP (Teixeira, 2001).

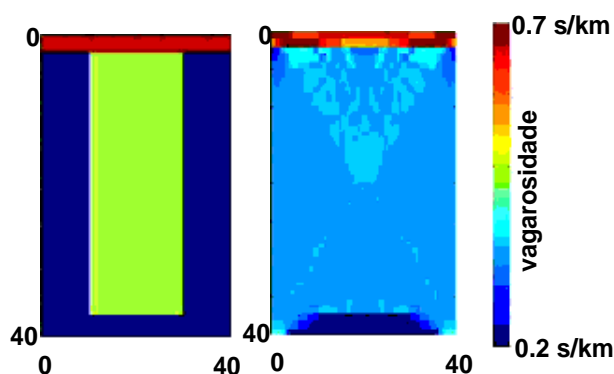


figura 8 – a) Modelo cárstico em fase final.  
b) Inversão sísmica do modelo final.

## Conclusão

Analisando os resultados obtidos pelo SIRT foi possível perceber que a geometria dos raios é um fator muito importante nesse algoritmo.

Como em nosso estudo a área de ocorrência cárstica apresentou um alinhamento vertical e os raios cruzando a área na horizontal, verificou-se que usando apenas o arranjo *crosshole* a anomalia cárstica não seria convenientemente imageada (figura 8 b). No entanto, o SIRT apresentou bons resultados para os modelos cársticos em fase inicial e intermediária (figuras 5 b, 6 b), com resultado deficiente no mapeamento da fase final, como já mencionado.

A tomografia sísmica de poço pode ser uma ferramenta muito importante para imagear problemas de geologia de engenharia e ambientais. Um problema a se enfrentar seria a aquisição dos dados, devido a baixa energia da fonte sísmica de poço. Para isso é preciso usar outras geometrias de tomografia de poço, como a *hole-to-surface*. Tendo assim uma melhor distribuição dos raios.

## References

- Berryman, J. G. Nonlinear inversion and tomography: I – Borehole seismic tomography. Lectures notes. University of California, 165 p.
- Clayton, R. W. Seismic Tomography. Eos, Trans. Am. Geophys. 1984. Union, 65, 236 p.
- Cormack, A. M. Representation of a function by its line integrals, with some radiological applications. J. Appl. Phys., 34, 2722-7, 1963.
- Dines, K. A. And Lytle, R. J. Computerized geophysical tomography. Proc. IEEE, 67, 1065-1073.
- Duarte, O. O. Dicionário enciclopédico Inglês-Português de Geofísica e Geologia. Sociedade Brasileira de Geofísica, 1997. 304 p.
- Gordon, R., Bender, R. and Herman, G. T. Algebraic Reconstruction Techniques (ART) for three-dimensional electron microscopy and x-ray photography. J. Theor. Biol., 29, 471-481.
- Hounsfield, G. N. Computerized transverse axial scanning tomography: Part I. Description of the system. Br. J. Radiol., 1973. 46, 1016-22.
- Lee, W. H. K. And Stewart, S. W. Principles and applications of microearthquake networks, Advances in Geophysics. Supplement 2, Academic Press, New York, 1981.
- Lo, T. And Inderwiesen, P. L. Fundamentals of seismic tomography. Society Exploration Geophysics, 1994. 178 p.
- McMechan, G. A. Seismic tomography in boreholes. Inversion Geophysics, september, 1982.
- Menke, W. Geophysical data analysis: Discrete inverse theory. 1984, 260 p.
- Radon, J. Über die bestimmung von funnktionen durch ihre integralwete langs gewisser mannigfaltigkeiten. Ber. Verh. Saechs. Akad. Wiss Leipzig. Math. Phys. Kl., 1917, 62, 262-77.
- Teixeira, W., et. al. Decifrando a Terra. 2001. 557 p.