

## Análise comparativa de métodos para estimativa de velocidade de ondas S

José Sampaio de Oliveira & Jorge Leonardo Martins

Coordenação da Área de Geofísica, Observatório Nacional - MCT, Brazil

Copyright 2009, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation at 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

**In this work, we present a comparative analysis of three methods proposed for constructing S-wave sonic well logs. The first technique is based on the Biot-Gassmann theory. This technique presents a formula for the P- to S-wave velocity ratio, with some refinements to the theory. The second technique proposes estimation of S-wave velocities using empirical models that depend only on porosity and clay content. The third investigated technique consists in the minimization of the difference between measured and estimated P-wave velocities, considering estimation of the parameter  $\alpha$  (i.e., the degree of rock consolidation). We used a small well log interval in order to compare these three techniques. Since the acting pressure is a fundamental parameter in the first and second techniques, we obtained poor estimations between measured and estimated S-wave velocities. The third technique exhibited very good results because only measured P-wave velocities are needed for estimating S-wave velocities.**

### Introdução

O uso de perfis sônicos é de grande importância para as técnicas de modelagem sísmica e de ampla utilização na caracterização de formações geológicas. Os dados obtidos através da perfilagem geofísica em poços mais antigos normalmente não possuem medidas de velocidade. Nem sempre é do interesse do ponto de vista financeiro para a indústria perfilar poços antigos, tendo em vista o alto investimento necessário para reservatórios com produção declinante (i.e., reservatórios maduros).

As medidas efetuadas no perfil sônico dependem de vários parâmetros como porosidade, fator de consolidação, argilosidade, como mostra alguns trabalhos da literatura (Castagna et al., 1985; Augusto & Martins, 2008). Os métodos numéricos utilizados Han et al. (1986), Lee (2003) e Lee (2006) para a estimativa desses perfis levam em conta a influência desses parâmetros sobre as velocidades. O trabalho de Han et al. (1986) considera porosidade e argilosidade como os principais parâmetros da dependência das velocidades. Semelhantemente a contribuição de Eberhart-Phillips et al. (1989), além de porosidade e argilosidade, incorporaram pressão atuante nos modelos de Han et al. (1986). Também numa

tentativa de incorporar pressão atuante na dependência da razão  $V_p/V_s$ , Lee (2003) propõe uma técnica baseada na teoria Biot-Gassmann. Uma dificuldade inicial no uso dessa técnica é a necessidade do conhecimento a priori da pressão diferencial, que pode ser um dado indisponível. Indiretamente, o chamado grau de consolidação  $\alpha$  também depende da pressão atuante. Entretanto, Lee (2006) considerou a pressão atuante de forma implícita, propondo uma técnica bem mais simples, também baseada na teoria Biot-Gassmann, para estimativa de  $V_s$  a partir de  $V_p$ . Na seção seguinte, apresentamos resultados da comparação desses três métodos mencionados.

### Metodologias

Nas subseções a seguir, apresentamos sumariamente as técnicas que utilizamos para fins de comparação.

#### 1 - Razão $V_p/V_s$

A razão do quadrado das velocidades, compressional e cisalhante, possui uma série de aplicações, tais como: identificação de fluidos nos poros, determinação do grau de consolidação, indicador de litologia (Wyllie et al., 1958; Miller & Stewart, 1990). O trabalho de Lee (2003) utiliza a teoria de Biot-Gassmann para derivar uma relação para cálculo da razão das velocidades.

Da teoria Biot-Gassmann, escrevemos o módulo de compressão  $k$  e módulo de cisalhamento  $\mu$  em função do coeficiente de Biot  $\beta$ :

$$k = k_{ma}(1 - \beta) + \beta^2 M, \quad (1)$$

e

$$\mu = \mu_{ma}(1 - \beta). \quad (2)$$

Os parâmetros  $k_{ma}$  e  $\mu_{ma}$  são os módulos de compressão e de cisalhamento da matriz da rocha. O parâmetro  $M$  é dado em função do coeficiente de Biot, porosidade, e dos módulos de compressão do fluido e da matriz como segue:

$$\frac{1}{M} = \frac{(\beta - \phi)}{k_{ma}} + \frac{\phi}{k_{fl}}. \quad (3)$$

As velocidades compressoriais e cisalhantes são relacionadas como (Telford et al., 1990):

$$V_p = \sqrt{\frac{k + \frac{4\mu}{3}}{\rho}}, \quad (4)$$

e

$$V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}. \quad (5)$$

Fazendo então uma simples manipulação algébrica com a equações acima, conseguimos escrever a razão do

quadrado das velocidades como:

$$\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 = \frac{4}{3} + \frac{k_{ma}}{\mu_{ma}} + \frac{\beta^2 M}{\mu_{ma}(1-\beta)}. \quad (6)$$

A contribuição fundamental no trabalho de Lee (2003) foi a incorporação de alguns fatores cruciais (vide  $n$  e  $G$  a seguir) que implicitamente representam variações na pressão diferencial  $P_d$ , ou seja:

$$n = 0.67 + 0.77 \exp\left[-\frac{P_d}{17.78}\right], \quad (7)$$

e

$$G = 0.9552 + 0.0448 \exp\left[-\frac{C_v}{0.06714}\right], \quad (8)$$

onde  $C_v$  denota argilosidade. Com esse refino obtemos uma maior precisão nos resultados quando expressamos uma velocidade em função da outra. Assim, a expressão para a razão do quadrado das velocidades toma a seguinte forma:

$$\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 = \frac{4}{3} + \frac{k_{ma}}{\mu_{ma}G^2(1-\phi)^{2n}} + \frac{4[1-G^2(1-\phi)^{2n}]}{3G^2(1-\phi)^{2n}}. \quad (9)$$

## 2 - Modelos empíricos para $V_s$

O trabalho elaborado por Han et al. (1986) propõe uma metodologia muito simples para a estimativa das velocidades  $V_p$  e  $V_s$ . Basicamente, a técnica consiste no uso de um modelo empírico que somente depende da porosidade e da argilosidade. Esses modelos para as velocidades foram derivados a partir da medida das velocidades compressional e cisalhante em 75 amostras de arenitos, com porosidades  $\phi$  variando entre 2% e 30% e argilosidade  $C_v$  entre 0% e 50%.

Para as velocidades cisalhantes com pressão atuante de 10, 20 e 30 MPa, o trabalho de Han et al. (1986) obtiveram as seguintes relações lineares multivariadas:

$$V_s = 3.29 - 4.73\phi - 1.74C_v, \quad (10)$$

$$V_s = 3.39 - 4.73\phi - 1.81C_v, \quad (11)$$

$$V_s = 3.47 - 4.84\phi - 1.87C_v, \quad (12)$$

respectivamente. O resultado apresentado na Figura 2 foi obtido utilizando a equação 12 que equivale a pressão atuante de 30 MPa.

## 3 - Método simples para predição de $V_s$

Lee (2006) propôs um método iterativo para predição de  $V_s$  a partir das velocidades  $V_p$  medidas. O modelo físico é baseado nos módulos de compressão e de cisalhamento da rocha seca. As velocidades elásticas (baixa frequência) em sedimentos saturados com água podem ser estimadas a partir dos módulos elásticos da rocha seca utilizando as equações de Biot-Gassmann. Logo, se os módulos elásticos da rocha seca podem ser extraídos a partir do perfil de velocidades  $V_p$ , facilmente podemos construir o perfil de velocidades  $V_s$ . Para isso, basta que minimizemos a diferença entre o perfil medido  $V_p^*$  e o perfil  $V_p^m(\alpha)$  (i.e., o modelo físico). O parâmetro da dependência  $\alpha$  é denominado grau de consolidação. Assim,

$$V_p^* - V_p^m(\alpha) \approx 0. \quad (13)$$

## Resultados

As técnicas investigadas acima foram aplicadas para um poço com os seguintes perfis: caliper, variação na medida de densidade, sônico de ondas P, sônico de ondas S, raios gama, resistividade elétrica, porosidade de neutrons e densidade efetiva. Consideramos a mesma pressão atuante na aplicação das duas primeiras técnicas (i.e., 30 MPa), visto que a motivação do trabalho é a comparação dos métodos sobre as mesmas condições iniciais e dados de pressão atuante indisponíveis.

Notamos claramente que o método proposto por Lee (2003) parte de uma relação empírica (i.e., teoria Biot-Gassmann) que depende implicitamente da pressão atuante, informação nem sempre disponível na prática. Semelhantemente, a aplicação dos modelos empíricos publicados no trabalho de Han et al. (1986) demonstram a necessidade do conhecimento a priori da pressão atuante no intervalo sedimentar.

Por sua vez, técnica proposta por Lee (2006) apresentou resultados excelentes do ponto de vista geofísico. O fato de se extrair os módulos de cisalhamento e de compressão do perfil calculado  $V_p^m$  incorpora muita informação geológica para estimativa de  $V_s$ . O erro máximo absoluto considerado durante o processo de minimização do funcional  $V_p^* - V_p^m$  foi estabelecido como sendo muito pequeno, e grau de consolidação  $\alpha$  ficou abaixo de 110 para o intervalo sedimentar analisado. No trabalho de Lee (2006),  $\alpha$  ficou abaixo de 40. No entanto, Lee alerta em seu artigo que não há um intervalo definido para  $\alpha$ . Ou seja,  $\alpha$  varia de acordo com o tipo de litologia e certamente é influenciado pela diagênese da rocha.

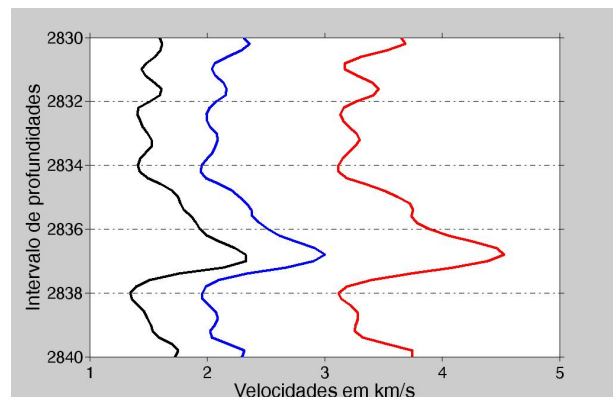


Figure 1: Resultado obtido pelo método da razão das velocidades de Lee (2003). Em azul temos o perfil de velocidades  $V_s$  estimado e, em preto, o medido. A curva em vermelho representa o perfil de velocidades  $V_p$ .

## Conclusões e observações

Minimizar a diferença entre os perfis  $V_p^*$  medido e  $V_p^m$  modelo através da utilização de um parâmetro de consolidação  $\alpha$  (Lee, 2006), foi a técnica que apresentou os melhores resultados. A necessidade de conhecermos a pressão atuante a priori torna o uso das técnicas propostas por Han et al. (1986) e Lee (2003) proibitivas, na medida em que esse é um parâmetro nem sempre disponível.

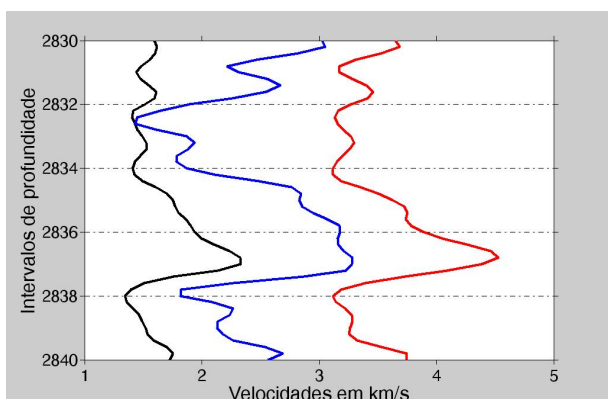


Figure 2: Resultado obtido pelo método dos coeficientes de Han et al. (1986). Em azul temos o perfil de velocidades  $V_s$  estimado e, em preto, o medido. A curva em vermelho representa o perfil de velocidades  $V_p$ .

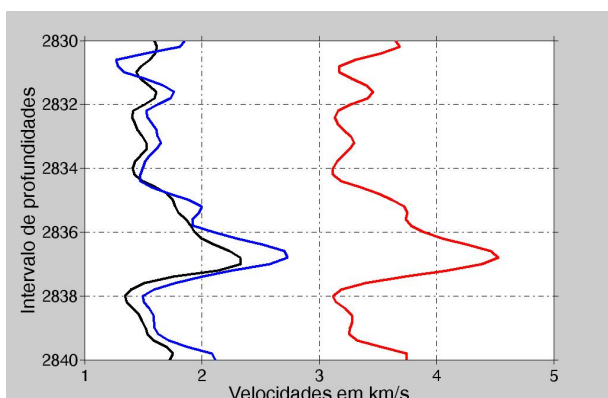


Figure 3: Resultado obtido pelo método proposto em Lee (2006), que define  $V_p$  em função do grau de consolidação  $\alpha$ . Em azul temos o perfil de velocidades  $V_s$  estimado e, em preto, o medido. A curva em vermelho representa o perfil de velocidades  $V_p$ .

Eberhart-Phillips, D., Han, D-H., and Zoback, M. D., 1989, Empirical relationships among seismic velocity, effective pressure, porosity, and clay content in sandstone: *Geophysics*, 54, 82-89.

Miller, S. L. M., and Stewart, R. R., 1990, Effects of lithology, porosity and shaliness on P- and Swave velocities from sonic logs: *Canadian Journ. of Expl. Geophysics*, 26, 94-103.

Telford, W. M., Geldart, L. P. and Sheriff, R. E., 1990 *Applied Geophysics*, 2 ed. Cambridge University Press.

Wyllie, M. R. J., Gregory, A. R., and Gardner, L. W., 1958, An experimental investigation of factors affecting elastic wave velocities in porous media: *Geophysics*, 23, 459-493.

**Agradecimentos**

José Oliveira agradece a CAPES pela bolsa de pesquisa para desenvolvimento de dissertação de mestrado no Curso de PG em Geofísica do Observatório Nacional, MCT. Os resultados aqui apresentados serão utilizados durante o desenvolvimento da dissertação de mestrado de José Sampaio de Oliveira, intitulada "Mapas de impedância elástica no Reservatório Namorado, Bacia de Campos". Jorge Martins reconhece o apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, CNPq, Brasil, (Edital 02/2006 Universal, processo no. 471647/2006-3), através do projeto de pesquisa intitulado "Caracterização de Anisotropia Sísmica Usando Perfis Geofísicos de Poços de Petróleo e Gás".

**Referências**

Lee, M. W., 2003, Velocity Ratio and its Application to Predicting Velocities, U.S. Geological Survey Bulletin 2197, February 2003.

Han D., Nur A. e Morgan D., 1986, Effects of porosity and clay content on wave velocities in sandstones, *GEOPHYSICS*, 51, 2093-2107.

Lee, M. W., 2006, A simple method to predicting S-wave velocity, *GEOPHYSICS*, 71, 161-164.

Castagna, J. P., Batzle, M. L., and Eastwood, R. L., 1985, Relationships between compressional-wave and shear-wave velocities in clastic silicate rocks, *Geophysics*, 50, 571-581.

Augusto, F. O. A. e Martins, J. L., 2008, Relações Empíricas Não-Convencionais para Estimativa de Perfis Sônicos de Ondas Compressionais, Rio Oil & Gas 2008 Expo and conference, Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustíveis, 15-18 Setembro, Rio Centro, Rio de Janeiro, CD-ROM.