



Estimativa de V_s a partir de V_p usando equações empíricas

Matias Costa de Sousa (FAGEOF/UFPA), José Jadsom Sampaio de Figueiredo (CPGF/UFPA/INCT-GP) and Leo Kirchof Santos (CPGF/UFPA/INCT-GP)

Copyright 2015, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation during 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

Seismic wave velocities are very important in seismic interpretation and determination of lithology. However, S-wave velocity is often unavailable in most of the seismic acquisitions due the difficulties in acquire its record. The purpose of this work is to perform shear wave velocity prediction by using well logging data from the Norne Field, Norwegian Sea. Our approach lays on two different mathematical relations, each one containing two parameters, all of them related to the local lithology. Based on the well logging data available, the parameters that best relates V_s to V_p indicate that the empirical method is an useful alternative to predict shear wave velocity.

Introdução

Equações empíricas são ferramentas científicas que permitem expressar matematicamente diversas grandezas, entretanto, requerem análises contundentes para assegurar sua efetividade física. Velocidade de onda S é uma informação elemental ao método sísmico, contudo, diferentemente de perfis de velocidade de onda compressional, não é disponibilizada ou obtida com regularidade. Estimar empiricamente a velocidade da onda cisalhante apresenta-se como uma alternativa interessante para uma melhor fundamentação da interpretação sísmica.

Nesse contexto, a boa disponibilidade de perfis sônicos possibilita encontrar relações que equacionem as velocidades de onda P e S com boa precisão. Essa técnica envolve o cálculo de parâmetros associados à litologias específicas e à natureza da equação (Mavko, 2009). Perfis de raio gama também são essenciais a investigações de aspecto petrofísico, pois o comportamento radioativo das rochas permite inferir a distribuição geológica e auxiliar na compreensão de correlações observadas em cada região de estudo.

Algumas estimativas de densidade sugerem uma boa correspondência entre ondas P e S, como as relações de Gardner et. al., (1974) e Lindseth (1979), que são exemplos de equações efetivas ao método sísmico. A natureza matemática dessas duas equações será base para o desenvolvimento de duas outras similares, porém entre as velocidades das ondas elásticas (ondas P e S). Dessa forma, a estimativa de parâmetros petrofísicos

permitirá determinar duas relações entre V_p e V_s compatíveis com a litologia.

Fundamentos Teóricos

A abordagem proposta é verificar quais parâmetros melhor relacionam perfis de velocidade dos dados de poço do Campo de Norne, considerando equações de natureza semelhante às estimativas de densidade mencionadas. Uma lei de potência de V_s em relação a V_p , de parâmetros a e b , consiste na relação:

$$V_s = aV_p^b, \quad (1)$$

O a de relação hiperbólica em função parâmetros c e d , a outra possível lei que relaciona as velocidades é dada por:

$$V_s = c - \frac{d}{V_p}. \quad (2)$$

As medidas disponíveis de 9 poços da região foram utilizadas para estimar as duas leis apresentadas, de forma que o procedimento é o mesmo para ambas as equações e consiste no uso do método de aproximação por mínimos quadrados. Essa otimização matemática permite encontrar o melhor ajuste para o conjunto de dados de velocidades de 5 dos 9 poços, obtendo os parâmetros correspondentes a cada poço e um valor médio a ser aplicado nos 4 poços restantes. O ajuste de cada relação considera operações matriciais entre os dados de V_p e V_s , as quais foram executadas por meio do MATLAB.

O método aplicado para a equação (1) pode ser adaptado a partir do ajuste de mínimos quadrados para uma função linear (Potter e Stewart, 1998). Considerando perfis de velocidades (em km/s) de n elementos, os parâmetros a e b são calculados por:

$$b = \frac{n \sum_{i=1}^n (\ln V_{p_i} \ln V_{s_i}) - \sum_{i=1}^n (\ln V_{p_i}) \sum_{i=1}^n (\ln V_{s_i})}{n \sum_{i=1}^n (\ln V_{p_i})^2 - \left(\sum_{i=1}^n \ln V_{p_i} \right)^2}, \quad (3)$$

$$a = e^{\left(\frac{\sum_{i=1}^n (\ln V_{s_i}) - b \sum_{i=1}^n (\ln V_{p_i})}{n} \right)}, \quad (4)$$

Seguindo o princípio de ajuste de uma função linear, o método adaptado para a equação (2) resulta em parâmetros c e d definidos por

$$c = \frac{\sum_{i=1}^n (V_{s_i}) \sum_{i=1}^n (1/V_{p_i})^2 - \sum_{i=1}^n (1/V_{p_i}) \sum_{i=1}^n (V_{s_i}/V_{p_i})}{n \sum_{i=1}^n (1/V_{p_i})^2 - \left(\sum_{i=1}^n (1/V_{p_i}) \right)^2} \quad (5)$$

$$d = - \left(\frac{n \sum_{i=1}^n (V_{s_i}/V_{p_i}) - \sum_{i=1}^n (1/V_{p_i}) \sum_{i=1}^n (V_{s_i})}{n \sum_{i=1}^n (1/V_{p_i})^2 - \left(\sum_{i=1}^n (1/V_{p_i}) \right)^2} \right), \quad (6)$$

Levando-se em conta estas quatro equações de coeficientes e de um algoritmo elaborado em código do MATLAB, foi possível estudar os dados dos 9 poços, avaliando a efetividade das equações empíricas propostas.

Resultados

Os dados de poço do Campo de Norne apresentam diversas medidas, como a amostragem sônica, a qual foi utilizada para expressar os perfis de velocidade úteis à estimativa de velocidade de onda S para os poços que não contém essa informação. Após efetuar as devidas operações de ajuste de dados para a equação (1), foram obtidos os valores listados na *Tabela 1*. Além dos parâmetros, foram considerados os coeficientes de correlação relativos a cada poço.

Tabela 1: Parâmetros estimados para a Lei de Potência e respectivos coeficientes de correlação (r).

Poço	a	b	r
660810-B-4AH	0.93	0.59	0.65
660810-B-4H	0.72	0.77	0.77
660810-C-1H	0.61	0.94	0.82
660810-C-3H	0.61	0.95	0.84
660810-D-4H	0.58	0.95	0.77

Nota-se divergências dos valores obtidos em determinados poços com relação ao grau de correlação e a cada parâmetro, contudo, os valores de r indicam boa correlação, exceto para o primeiro poço, o qual apresenta ajuste moderado ($r < 70\%$). Analogamente, a *Tabela 2* apresenta os resultados do ajuste para a Equação (2).

Tabela 2: Parâmetros estimados para a Lei Hiperbólica e respectivos coeficientes de correlação (r).

Poço	c	d	r
660810-B-4AH	3.02	3.75	0.64
660810-B-4H	3.22	4.62	0.78
660810-C-1H	3.96	6.9	0.80
660810-C-3H	3.85	6.46	0.83
660810-D-4H	3.64	5.97	0.76

O grau de correlação nas estimativas para a lei hiperbólica de V_p também indicam ajuste satisfatório para os 5 poços. Para o poço 660810-C-3H, por exemplo, há uma forte correlação ($r > 80\%$). A *Figura 1* apresenta perfis de velocidade e ajustes obtidos para o poço 660810-B-4AH, os quais apresentam correlação moderada.

A partir da média aritmética dos valores calculados obtém-se os seguintes valores para os parâmetros: $a=0.69$, $b=0.84$, $c=3.54$ e $d=5.54$. Estes valores foram avaliados por meio dos dados de poço restantes, verificando a distribuição das curvas estimadas em relação aos perfis de velocidades disponíveis. Considerou-se a distribuição de erros na estimativa para os 4 poços de teste como ferramenta avaliativa de cada equação. A *Figura 2* ilustra a avaliação de erro da estimativa de V_s para o poço 660810-C-4AH, enquanto a *Figura 3* apresenta os perfis de interesse, como V_s estimada pelas equações (7) e (8), definidas pelos parâmetros médios obtidos, além da estimativa feita a partir da equação (9), elaborada por Castagna et. al. (1985):

$$V_s = 0.69 V_p^{0.84}, \quad (7)$$

$$V_s = 3.54 - \frac{5.54}{V_p}, \quad (8)$$

$$V_s = 0.86 - 1.17 V_p, \quad (9)$$

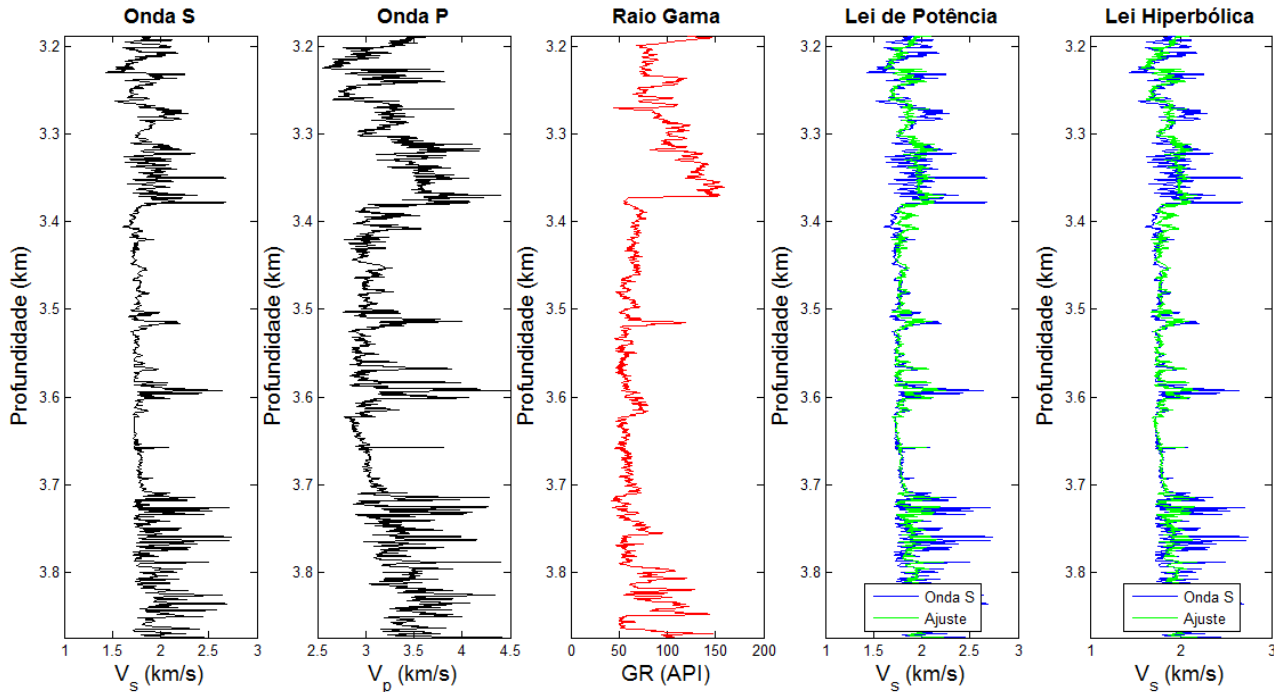


Figura 1: Perfis e ajustes relativos ao poço 660810-B-4AH.

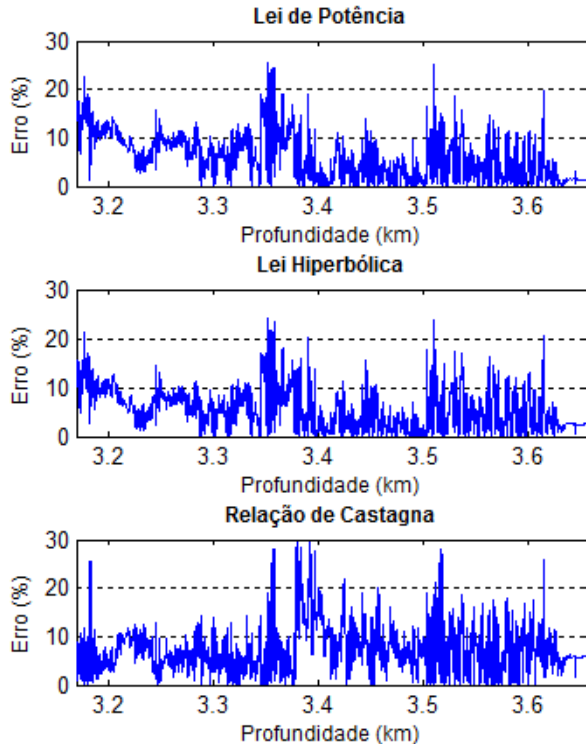


Figura 2: Distribuição de erro relativo das estimativas para o poço 660810-C-4AH.

Ao aplicar os parâmetros obtidos aos demais poços, torna-se evidente que as velocidades estimadas apresentam desvios pontuais significativos. Para o poço 660810-C-4AH, por exemplo, a distribuição de erro decresce na faixa menos profunda e acompanha as variações bruscas de V_p . Nota-se que V_s está superestimada na faixa correspondente às maiores intensidades de Raio Gama, associando a provável concentração elevada de argila à atenuação da correlação. Por outro lado, na região onde o Raio Gama apresenta menor intensidade, as curvas se superpõem com melhor ajuste, indicando boa correlação em prováveis camadas de arenito.

Além das considerações litológicas, ao comparar as duas leis obtidas, verifica-se que estas apresentam grau de correlação similar. Os deslocamentos relativos das curvas de estimativa da Figura 3 indicam desvios levemente superiores na curva da Lei de Potência. Também observa-se que a relação de Castagna et. al. (1985) subestima a velocidade e apresenta erro relativo superior em boa parte do perfil.

Verificar o desempenho das estimativas com base no cálculo da Raiz do Erro Quadrático Médio (REQM) completa a análise de erro adotada. A Tabela 3 contém os valores obtidos por meio da relação abaixo

$$REQM = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (E_i - O_i)^2}, \quad (10)$$

no qual E_i e O_i são, respectivamente, valor estimado e valor observado.

Tabela 3: REQM para Lei de Potência (m), Lei Hiperbólica (n) e Relação de Castagna et. al. (1985) (p).

Poço	m	n	p
660810-C-2H	0.2013	0.1977	0.2859
660810-C-4AH	0.1344	0.1293	0.1706
660810-E-3H	0.1078	0.1219	0.2753
660810-F-1H	0.1347	0.1075	0.1789

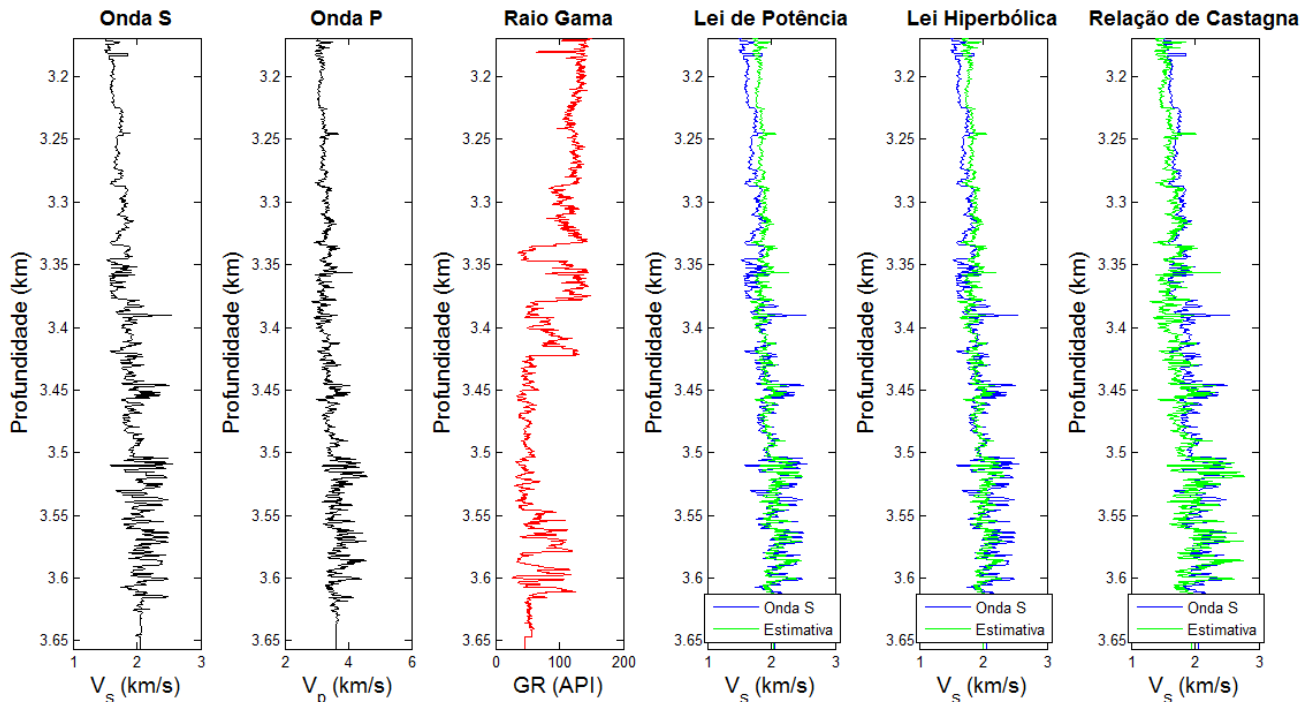


Figura 3: Perfis e estimativas relativos ao poço 660810-C-4AH.

Considerando os valores de m , n e p , pode-se afirmar que a precisão da estimativa das duas leis propostas é maior que a precisão da relação empírica comparada (Castagna et. al., 1985), pois p supera m e n em todos os poços analisados. Por meio desses resultados constata-se que existe boa correlação entre as velocidades elásticas, as quais podem ser expressas por relações empíricas de diferentes naturezas matemáticas, assegurando a ligação dos parâmetros calculados com a litologia de Norne.

Conclusões

As relações empíricas sugeridas configuram uma alternativa viável para estimar velocidades sísmicas, pois o grau de correlação observado nos ajustes e a distribuição de erro na aplicação dos parâmetros indicam forte correspondência entre os perfis de velocidade, principalmente nas faixas onde o perfil de Raio Gama indica provável presença de reservatório associado a camadas de arenito. Observou-se durante o emprego dos parâmetros que ambas as relações produziram

estimativas similares, permitindo inferir V_s por meio de V_p . Portanto, tanto a Lei de Potência como a Lei Hiperbólica são apropriadas para a litologia do Campo de Norne.

No âmbito da interpretação sísmica, equações empíricas como as discutidas neste trabalho apresentam ampla utilidade, pois a obtenção de parâmetros adequados para estimar velocidade de onda S contribui para correlacionar as demais informações adquiridas em campo. Por meio de dados de poço é possível elaborar equações que aproximem com precisão grandezas de interesse geofísico, como as relações V_p - V_s avaliadas.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer a Universidade Norueguesa de Ciência e Tecnologia (NTNU) por disponibilizar os dados de poço do Campo de Norne.

Referências

CASTAGNA, J.P., BATZLE, M.L. e EASTWOOD, R.L., 1985. Relationships between compressional-wave and shear-wave velocities in clastic silicate rocks, *Geophysics*, 50, 571-581.

GARDNER, G.H.F., GARDNER, L.W., e GREGORY, A.R., 1974. Formation velocity and density – the diagnostic basics for stratigraphic traps, *Geophysics*, 39, 770-780.

LINDSETH, R.O., 1979. Synthetic sonic logs – a process for stratigraphic interpretation, *Geophysics*, 44, 3-26.

MAVKO, G., MUKERJI T., e DVORKIN, J., 2009. *The Rock Physics Handbook: Tools for Seismic Analysis in Porous Media*, Cambridge University Press.

POTTER, C.C., e STEWART, R.R., 1998. Density predictions using VP and VS sonic logs, CREWES, Research Report, Vol. 10.