



## Intervalos de variação da velocidade cisalhante no arenito Namorado a partir de um modelo para meios efetivos

Julio Kosaka de Oliveira<sup>1(\*)</sup>, José Agnelo Soares<sup>2</sup> e Jorge Leonardo Martins<sup>3</sup> (<sup>1</sup>Depto. de Geologia/IGEO/UFRJ, PRH-ANP-18, Brasil, <sup>2</sup>Depto. de Geologia/IGEO/UFRJ, Brasil, <sup>3</sup>Coordenação da Área de Geofísica, ON/MCT, 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

In this paper, shear-wave velocity ( $V_S$ ) intervals were estimated for 32 Namorado sandstone's samples using Hashin & Shtrikman's (HS) bounds. In order to achieve this purpose, we assumed the Namorado sandstone as a rock composite with 40% quartz, 25% feldspar, 20% oil, 10% clay and 5% brine. The upper and lower HS bounds resulted from this hypothesis remained in the following intervals: 22.15 and 6.26 GPa for bulk modulus ( $K$ ), and 17.82 and 2.66 GPa for shear modulus ( $\mu$ ). Moreover, distinct values for the Poisson coefficient ( $\nu$ ) were assumed (0.30, 0.25, 0.20, 0.15 and 0.10). The availability of P-wave sonic (DT) and density (RHOB) logs allowed calibration of  $K$  and  $\mu$  for each assumed value of  $\nu$ , as a function of compressional velocity ( $V_P$ ) and bulk density ( $\rho$ ). Therefore, a linear relationship between  $K$  and  $\mu$  could be calculated for each  $\nu$  used, as well as constant  $V_P/V_S$  values (1.8709 for  $\nu = 0.30$ , 1.7319 for  $\nu = 0.25$ , 1.6329 for  $\nu = 0.20$ , 1.5584 for  $\nu = 0.15$  and 1.4999 for  $\nu = 0.10$ ). As a result, an interval containing probable  $V_S$  values could be estimated for each value observed of  $V_P$ .

### Introdução

A sísmica de exploração e a perfuração geofísica de poços constituem os dois métodos utilizados integralmente nas atividades de caracterização e desenvolvimento de reservatórios de petróleo e gás. Nos métodos sísmicos aplicados à exploração de óleo e gás, as velocidades sísmicas constituem, em conjunto com as densidades e o fator de qualidade  $Q$  das rochas, as propriedades diagnósticas. A partir dos dados sísmicos, objetiva-se reconstruir a distribuição dessas propriedades diagnósticas em subsuperfície. O processo seguinte visa correlacionar as anomalias presentes nessas distribuições com as feições geológicas evidenciadas nas seções sísmicas. Entretanto, embora a sísmica de exploração seja capaz de iluminar uma grande extensão areal, a resolução alcançada (i.e., a capacidade de identificar topo e base de uma camada sedimentar) é da ordem de 20-50 m. Essa limitação explica o uso integrado da sísmica de exploração com os métodos de perfuração geofísica de poços, que podem resolver

camadas de 15-30 cm. Porém, as medidas efetuadas pelas ferramentas de perfuração (sônico e de densidades, por exemplo) se restringem à periferia do poço.

As velocidades de ondas compressoriais ( $V_P$ ) e de ondas cisalhantes ( $V_S$ ) são propriedades do material elástico através do qual essas ondas se propagam. Conceitualmente, quando a propagação ocorre em rochas, as velocidades compressoriais e cisalhantes são definidas simplesmente por velocidades sísmicas. Considerando que rochas são materiais heterogêneos de composição muito complexa, as velocidades sísmicas não se constituem em bons indicadores de litologia, pois sofrem, indiretamente, a influência dos componentes das rochas. Em se tratando de rochas sedimentares, as velocidades são fortemente influenciadas, por exemplo, pela densidade, porosidade, argilosidade e saturação de fluidos. Portanto, é comum nos estudos de caracterização de reservatórios de petróleo e gás investigar tendências de variação de  $V_P$  e  $V_S$  com alguns parâmetros físicos. Han *et al.* (1986), por exemplo, usando informações de  $V_P$  e  $V_S$  obtidas de análise ultrassônica de testemunhos, aplicaram regressão linear para estudar a dependência dessas velocidades com a porosidade e argilosidade em arenitos saturados e folhelhos. Investigação semelhante pode ser encontrada em Miller & Stewart (1990), que propuseram modelos matemáticos para prever a dependência linear de  $V_P$  e  $V_S$  com a porosidade e argilosidade em litologias puras e mistas. Nesse caso, as velocidades sísmicas foram extraídas de perfis de poços. Seguindo o trabalho de Han *et al.* (1986), Oliveira & Martins (2003) e Oliveira *et al.* (2004), também utilizando perfis geofísicos de poços, propuseram modelos matemáticos para a predição apenas de  $V_P$  no arenito Namorado, na Bacia de Campos, em função da porosidade e argilosidade. A magnitude dos coeficientes de correlação obtida nas regressões lineares de Oliveira & Martins (2003) e Oliveira *et al.* (2004) permite prever, com alta confiabilidade, as velocidades compressoriais do arenito Namorado.

Dando continuidade aos trabalhos de Oliveira & Martins (2003) e Oliveira *et al.* (2004), utilizamos a teoria de meios efetivos (Hashin & Shtrikman, 1963; Berryman, 1995) para investigar os intervalos de variação das velocidades cisalhantes no arenito Namorado. Dados de análise seqüencial de testemunhos (ANASETE) permitiram estimar os percentuais dos componentes do arenito, i.e., matriz sólida, argilosidade e saturação de fluidos. A fim de impor restrições aos intervalos mínimo e máximo da teoria de meios efetivos, adotamos cinco cenários para o coeficiente de Poisson ( $\nu$ ). Em conseqüência, obtivemos cinco relações lineares entre  $V_S$  e  $V_P$  para o arenito Namorado. A motivação para esta

investigação decorre da ausência de medidas de  $V_S$  nos dados de perfilagem de poços que compõem o conjunto de dados Campo Escola de Namorado. Numa etapa posterior, planejamos estender a presente investigação para todo o pacote sedimentar que forma o reservatório Namorado.

### Descrição dos dados

Os dados utilizados no presente trabalho pertencem ao conjunto de dados denominado Campo Escola de Namorado, o qual foi cedido pela ANP (Agência Nacional do Petróleo, Brasil) para fins didáticos às instituições de ensino e pesquisa brasileiras. Correspondem a análises sequenciais de testemunhos (ANASETE) juntamente com informações relacionadas aos perfis sônico (DT) e de densidade (RHOB), respectivamente expressos em  $\mu\text{s}/\text{ft}$  e  $\text{g}/\text{cm}^3$ . Vale ressaltar que a velocidade da onda P pode ser obtida diretamente a partir do perfil DT através da simples conversão de unidades. Aqui, a unidade  $\mu\text{s}/\text{ft}$  foi convertida para  $\text{km}/\text{s}$ .

Para a seleção das amostras, inicialmente foi utilizada a ANASETE de forma a identificar um intervalo contínuo de arenito Namorado. Uma vez identificado, o mesmo foi, então, localizado nos perfis geofísicos mencionados a partir dos valores de profundidade contidos na caixa do testemunho presente na Figura 1.

Ao todo, foram selecionadas 32 amostras presentes no poço 3NA 0004 RJS, localizado no Campo de Namorado. De acordo com as descrições presentes na ANASETE, essas amostras se referem à fácies arenito médio gradado, que apresenta composição arcoseana, boa seleção dos grãos, aspecto maciço e gradação às vezes incipiente ou do tipo cauda grossa. A escolha de um intervalo arenoso contendo uma única fácies tem como objetivo a utilização de um material mais homogêneo possível, pois isto favorece a aplicação do modelo adotado para meios efetivos. A composição arcoseana da fácies selecionada indica que o arenito Namorado constitui-se basicamente de quartzo e feldspato. Vasquez (2000) também aponta a presença de fragmentos líticos, enquanto Silva *et al.* (2003) destaca a ocorrência de uma extensiva cimentação carbonática.

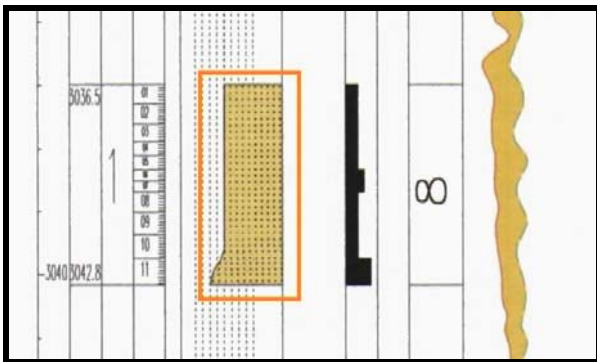


Figura 1 – Identificação do intervalo de arenito Namorado selecionado para o presente estudo (retângulo laranja) com base na ANASETE do poço 3NA 0004 RJS. O número 8 se refere à fácies arenito médio gradado.

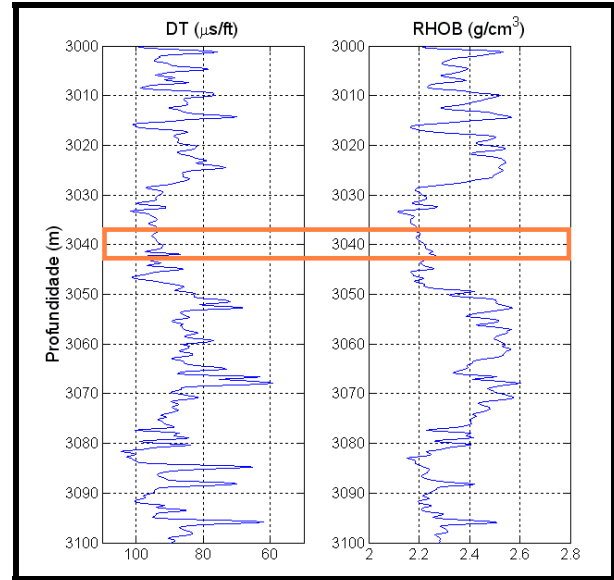


Figura 2 – Localização do intervalo selecionado de arenito Namorado nos perfis DT e RHOB (retângulo laranja), com base nos valores de profundidade registrados na caixa do testemunho presente na Figura 1.

### Metodologia

A estimativa dos intervalos de velocidade cisalhante para as 32 amostras selecionadas foi feita a partir do modelo para meios efetivos baseado em Hashin & Shtrikman (1963) e Berryman (1995). Este modelo permite calcular os limites inferior e superior das constantes elásticas de uma rocha com base nas várias fases que a compõem. Os limites do módulo volumétrico, incompressibilidade ou *bulk modulus* ( $K$ ) são calculados a partir das seguintes expressões:

$$K_{\min} = \left[ \sum_{i=1}^N \frac{f_i}{K_i + \frac{4}{3} \mu_{\min}} \right]^{-1} - \frac{4}{3} \mu_{\min} \quad (1)$$

$$K_{\max} = \left[ \sum_{i=1}^N \frac{f_i}{K_i + \frac{4}{3} \mu_{\max}} \right]^{-1} - \frac{4}{3} \mu_{\max} \quad (2)$$

Já o módulo de cisalhamento ou *shear modulus* ( $\mu$ ) tem seus limites definidos a partir das equações

$$\mu_{\min} = \left[ \sum_{i=1}^N \frac{f_i}{\mu_i + C_{\min}} \right]^{-1} - C_{\min} \quad (3)$$

$$\mu_{\max} = \left[ \sum_{i=1}^N \frac{f_i}{\mu_i + C_{\max}} \right]^{-1} - C_{\max} \quad (4)$$

sendo que os termos  $C_{\min}$  e  $C_{\max}$  podem ser calculados a partir da expressão

$$C_i = \frac{\mu_i}{6} \left( \frac{9K_i + 8\mu_i}{K_i + 2\mu_i} \right), \quad (5)$$

onde, somente para esta equação, o subscrito  $i$  deve ser substituído por  $min$  ou  $max$  para torná-la compatível com as equações (3) e (4), respectivamente.

Os termos  $f_i$ ,  $K_i$  e  $\mu_i$  correspondem, respectivamente, à fração volumétrica, à incompressibilidade e ao módulo de cisalhamento da  $i$ -ésima fase. Já os termos  $K_{min}$  e  $K_{max}$  se referem, respectivamente, aos módulos volumétricos mínimo e máximo entre todas as fases. Por fim, os termos  $\mu_{min}$  e  $\mu_{max}$  correspondem, respectivamente, aos módulos de cisalhamento mínimo e máximo entre todas as fases.

Conforme já mencionado, o arenito Namorado apresenta uma composição arcoseana. Adicionalmente, como corresponde a uma rocha-reservatório, também se encontra saturado em óleo e água, além de apresentar um certo conteúdo de argila (Oliveira *et al.*, 2004). As frações volumétricas para cada fase, de acordo com a composição hipotética considerada neste trabalho, assim como seus respectivos módulos  $K$  e  $\mu$ , estão representados na Tabela 1. Considerou-se uma porosidade média de 25% para o arenito Namorado, com saturação de 80% de óleo e 20% de salmoura (Vasquez, 2000). E como ambos apresentam  $\mu$  nulo, já que correspondem a fluidos, o termo  $\mu_{min}$  utilizado nas equações (1), (2), (3) e (4) refere-se ao módulo de cisalhamento da argila.

Sabe-se que, para cada material, os módulos  $K$  e  $\mu$  podem ser calculados a partir do módulo de elasticidade ou de *Young* ( $E$ ) e do coeficiente de Poisson ( $\nu$ ), através das igualdades

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)} \quad (6)$$

$$\mu = \frac{E}{2(1+\nu)}. \quad (7)$$

Fase	Fração (%)	K (GPa)	$\mu$ (GPa)	Ref.*
quartzo	40	37	44	(1)
feldspato	25	46.7	23.63	(1)
óleo	20	1.089	0	(2)
argila	10	1.5	1.4	(1)
salmoura	5	3.01	0	(2)

Tabela 1 – Composição hipotética do arenito Namorado, juntamente com a caracterização das várias fases que o compõem. \*(1) Mavko *et al.* (1998), (2) Vasquez (2000).

O coeficiente de Poisson varia de 0 a 0.5, com os valores mais altos relacionados a materiais cada vez mais frágeis. O arenito Namorado corresponde a uma rocha de idade albiana, constituindo um material pouco consolidado. Como não se trata de um corpo homogêneo

nem isotrópico, apresenta distintos coeficientes de Poisson ao longo das 32 amostras selecionadas. Sendo assim, adotou-se para  $\nu$  os valores de 0.30, 0.25, 0.20, 0.15 e 0.10. Utilizando cada valor nas equações (6) e (7), são obtidas relações lineares entre  $K$  e  $\mu$ , que podem ser expressas segundo o modelo

$$K = a_1 \mu, \quad (8)$$

em que a constante  $a_1$  assume distintos valores, referentes a cada coeficiente de Poisson adotado.

Uma vez estabelecida a relação (8), é possível calcular os módulos  $K$  e  $\mu$  a partir da equação

$$V_P = \sqrt{\frac{K + \frac{4}{3}\mu}{\rho}}, \quad (9)$$

já que os valores de  $V_P$  e  $\rho$ , para cada amostra, são obtidos a partir dos perfis DT e RHOB, respectivamente. Ou seja,  $K$  e  $\mu$  são calibrados em função da velocidade compressional e da densidade.

Com o módulo  $\mu$  definido, é possível calcular a velocidade cisalhante através da equação

$$V_S = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}, \quad (10)$$

sendo  $\rho$  novamente a densidade obtida a partir do perfil RHOB.

Substituindo o valor de  $\mu$ , obtido através da equação (9), na equação (10), observa-se que, para cada valor de  $\nu$  adotado, é possível definir uma razão constante entre  $V_P$  e  $V_S$ .

## Resultados

A partir dos valores da Tabela 1, os limites inferior e superior obtidos para  $K$  são 6.26 e 22.15 GPa, enquanto  $\mu$  varia de 2.66 a 17.82 GPa, de acordo com as equações (1), (2), (3) e (4), respectivamente. Em ambos, este grande intervalo entre os valores mínimo e máximo de suas constantes elásticas pode ser justificado pela presença de fases referentes a materiais bastante distintos, inclusive com alternância de sólidos e fluidos. Isso porque o modelo aqui adotado supõe que a rocha seja isotrópica, o que não é o caso do arenito Namorado. Com relação às 32 amostras selecionadas, os valores máximos e mínimos de  $K$  e  $\mu$  para cada  $\nu$ , obtidos a partir das equações (8) e (9), respeitam esses intervalos limites, conforme se observa na Tabela 2.

Os valores da constante  $a_1$ , presente na equação (8), bem como da razão  $V_P/V_S$ , para cada  $\nu$  adotado, encontram-se na Tabela 3.

As relações perfeitamente lineares entre  $V_P$  e  $V_S$ , para cada coeficiente de Poisson, estão ilustradas na Figura 3. Nela, as linhas verticais pretas correspondem aos valores da velocidade compressional referentes a cada uma das 32 amostras selecionadas, os quais foram obtidos a partir do perfil DT e que variam de 3.03 a 3.51 km/s. Sendo

assim, esta figura, na verdade, sugere um intervalo de valores de  $V_S$  possíveis para cada  $V_P$  observado. Este intervalo tem seu limite superior na reta em magenta ( $\nu = 0.10$ ), enquanto seu limite inferior está na reta em vermelho ( $\nu = 0.30$ ). Por exemplo, uma amostra com  $V_P$  igual a 3.20 km/s apresentará um valor de  $V_S$  contido no intervalo entre 2.13 km/s (reta magenta) e 1.71 km/s (reta vermelha).

$\nu$	$K_{\min}$	$K_{\max}$	$\mu_{\min}$	$\mu_{\max}$
0.30	12.89	17.20	5.95	7.94
0.25	11.57	15.43	6.94	9.26
0.20	10.41	13.89	7.81	10.42
0.15	9.39	12.53	8.57	11.44
0.10	8.48	11.32	9.25	12.35

Tabela 2 – Valores máximos e mínimos de  $K$  e  $\mu$  verificados ao longo das 32 amostras selecionadas, para cada coeficiente de Poisson adotado.

$\nu$	$a_1$	$V_P/V_S$
0.30	2.1667	1.8709
0.25	1.6667	1.7319
0.20	1.3333	1.6329
0.15	1.0952	1.5584
0.10	0.9167	1.4999

Tabela 3 – Valores da constante  $a_1$ , presente na equação (8), e da razão  $V_P/V_S$ , para cada  $\nu$  adotado.

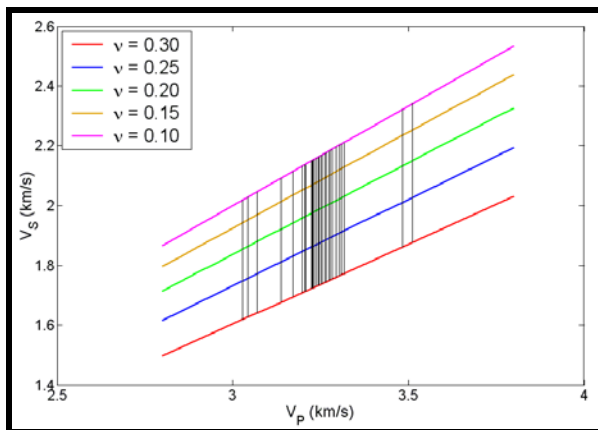


Figura 3 – Relações lineares entre  $V_P$  e  $V_S$  obtidas para cada valor de  $\nu$  adotado. As linhas verticais pretas correspondem aos valores da velocidade compressional das 32 amostras selecionadas, obtidos a partir do perfil DT e que variam de 3.03 a 3.51 km/s. Logo, para cada valor de  $V_P$  observado, tem-se um intervalo contendo possíveis valores para  $V_S$ , limitado pelas retas em vermelho ( $\nu = 0.30$ ) e em magenta ( $\nu = 0.10$ ).

As relações empíricas determinadas para os valores adotados do coeficiente de Poisson são expressas a partir da razão  $V_P/V_S$  (Tabela 3), e se encontram na Tabela 4.

$\nu = 0.30$	$V_S = 0.5345 V_P$
$\nu = 0.25$	$V_S = 0.5774 V_P$
$\nu = 0.20$	$V_S = 0.6124 V_P$
$\nu = 0.15$	$V_S = 0.6417 V_P$
$\nu = 0.10$	$V_S = 0.6667 V_P$

Tabela 4 – Relações matemáticas empíricas entre  $V_P$  e  $V_S$  representadas na Figura 3, obtidas a partir da razão  $V_P/V_S$  (Tabela 3).

A opção por utilizar um intervalo relativamente amplo de coeficiente de Poisson reside na tentativa de compreender uma possível grande variação dos valores de  $\nu$  para cada amostra de arenito Namorado selecionada, pois se trata de uma rocha que não é homogênea nem isotrópica.

### Conclusões

A adoção de valores constantes para o coeficiente de Poisson permitiu o estabelecimento de relações perfeitamente lineares, tanto entre os módulos  $K$  e  $\mu$ , quanto entre as velocidades compressional e cisalhantes do arenito Namorado. Além disso, os valores de  $K$  e  $\mu$  obtidos para as 32 amostras selecionadas respeitaram os limites mínimos e máximos de ambas as constantes elásticas, calculados a partir do modelo para meios efetivos de Hashin & Shtrikman (1963) e Berryman (1995). Isso garante uma boa confiabilidade da composição hipotética aqui adotada para o arenito Namorado. Por fim, as razões  $V_P/V_S$  encontradas para os vários coeficientes de Poisson adotados possibilitaram a delimitação de um intervalo contendo possíveis valores da velocidade cisalhante referentes a cada velocidade compressional observada nas amostras.

### Referências

- Berryman, J. G., 1995, Mixture theories for rock properties, in: *A Handbook of Physical Constants*, Ahrens, T.J., ed., American Geophysical Union, Washington, 236 pp.
- Han, D-H., Nur, A. & Morgan, D., 1986, Effects of porosity and clay content on wave velocities in sandstones: *Geophysics*, 51, 2093-2107.
- Hashin, Z. & Shtrikman, S., 1963, A variational approach to the elastic behavior of multiphase materials, *J. Mech. Phys. Solids*, 11, 127-140.
- Mavko, G., Mukerji, T. & Dvorkin, J., 1998, *The Rock Physics Handbook*, Cambridge University Press.

- Miller, S. L. M. & Stewart, R. R.**, 1990, Effects of lithology, porosity and shaliness on P- and S-wave velocities from sonic logs: Canadian Journ. of Expl. Geophysics, 26, 94-403.
- Oliveira, J. K. & Martins, J. L.**, 2003, Efeitos da porosidade e argilosidade nas velocidades compressoriais no arenito Namorado, Bacia de Campos, Brasil, 8th Intern. Cong. of the Brazilian Geophys. Society, Rio de Janeiro, September 14-18th, Intercontinental Hotel, Resumo Expandido – CD ROM.
- Oliveira, J. K., Soares, J. A. & Martins, J. L.**, 2004, Dependência da velocidade de ondas compressoriais com a porosidade e a argilosidade no arenito Namorado, *in*: Congresso Brasileiro de Geologia, 42, Araxá. *Anais...* Araxá, SBG.
- Silva, A., Protázio, J. M. B. & Remacre, A. Z.**, 2003, Análise wavelet aplicada na mudança de escala em perfis geofísicos do Campo de Namorado, *Revista Brasileira de Geociências* vol.33, n.2(Suplemento), p.121-126.
- Vasquez, G. F.**, 2000, Comportamento viscoelástico do arenito Namorado e suas relações com atributos faciológicos, Dissertação de mestrado, UNICAMP, 214 p.

#### **Agradecimentos**

Os autores agradecem à Agência Nacional do Petróleo (ANP) pelo apoio do Programa de Capacitação de Recursos Humanos em Geologia do Petróleo da UFRJ (Convênio PRH-ANP/MCT-18) para realização deste trabalho. Julio Kosaka de Oliveira possui atualmente uma bolsa de IC pelo PRH-ANP-18, matr. no. 2001.7499-2.