



Análise experimental da velocidade de ondas acústicas em função da saturação de fluido.

Caio Carreira & Marco Ceia, LENEP/UENF

Copyright 2011, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation during the 12th International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brazil, August 15-18, 2011.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 12th 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

One of the main goals in reservoir geophysics is to relate acoustic properties and fluid saturation. Several models can be found in the literature to relate acoustic velocities and fluid saturation. Biot-Gassman is the most used worldwide. This paper aims to show the results of an experimental work measuring P-wave velocities as fluid saturation varies due to evaporative drying. A comparison to the results predicted by the Biot-Gassman theory and Gardner's (velocity-density) empirical relation is also shown.

Introdução

O monitoramento das reservas petrolíferas ao longo do período produtivo é alvo de muitas discussões e pesquisas desde o início das atividades de exploração dos hidrocarbonetos. A sísmica 4-D revela-se então como uma ferramenta importante no entendimento das mudanças ocorridas dentro do reservatório ao longo de sua produção. Tal técnica consiste em dois ou mais experimentos de sísmica 3D que são realizados envolvendo apenas as três dimensões espaciais, enquanto a quarta dimensão representa o intervalo de tempo entre os experimentos, fornecendo assim, propriedades do reservatório que variam ao longo do tempo, como: saturação de água, saturação de gás, saturação de óleo, entre outros.

De acordo com Goertz & Knight (1998) o entendimento das relações entre a velocidade das ondas elásticas e a saturação de água em procedimentos experimentais mostra-se como um modo eficiente de se entender a distribuição dos fluidos e a conectividade dos poros em amostras de rochas. Além disso, a velocidade mostra-se como a mais importante propriedade física das rochas na calibração das seções sísmicas (Ceia & Missaglia, 2009).

A fórmula de Biot-Gassman nos fornece um valor para a velocidade da onda compressional em função da saturação, a partir da equação 1.

$$V_P = \sqrt{\frac{K_{sat} + (4V_S^2 \rho_b)/3}{\rho_{ma}(1 - \varphi) + \rho_w S_w \varphi + \rho_{ar} \varphi (1 - S_w)}}. (1)$$

Onde, V_P é a velocidade da onda P, V_S é a velocidade da onda S, S_w é a saturação de água, ρ_{ar} , ρ_w , ρ_b , e ρ_{ma} são,

respectivamente, as densidades do ar, da água, global e da matriz rochosa, e K_{sat} é o módulo de compressibilidade da amostra saturada, dado pela seguinte equação:

$$K_{sat} = K_{dry} + \frac{\left(1 - \frac{K_{dry}}{K_0}\right)^2}{\frac{\varphi}{K_{fl}} + \frac{1 - \varphi}{K_0} - \frac{K_{dry}}{K_0^2}}. (2)$$

Onde, K_{dry} é o módulo de compressibilidade da amostra seca, K_0 é o módulo da matriz mineral, φ é porosidade e K_{fl} é o módulo de compressibilidade do fluido.

Ao passo que a Lei de Gardner (Gardner et al., 1974) relaciona o valor da densidade global com a velocidade da onda P através da seguinte relação empírica:

$$\rho_b = 1.741V_p^{0.25}. (3)$$

Para a execução dos experimentos, foram utilizadas duas amostras de arenito Berea, com as seguintes características: amostra 1 (porosidade=0.226; comprimento=102.07mm; diâmetro=37.78mm, densidade da matriz=2.68 g/cm³) e amostra 2 (porosidade=0.175; comprimento=72.73mm; diâmetro=37.88mm; densidade da matriz=2.64 g/cm³). A densidade do fluido considerada foi aquela encontrada na literatura para a salmoura, cujo valor é 1,03 g/cm³.

Este trabalho visa a analisar a proximidade entre valores de velocidade da onda P e da densidade global encontrados, respectivamente, pelas equações (1) e (3) e aqueles encontrados através de ensaio experimental.

Metodologia

Saturação das Amostras

O procedimento de saturação das amostras consiste na substituição do ar pela solução nos poros da rocha à medida que a bomba de vácuo entra em funcionamento.

Inicialmente, as amostras secas foram pesadas utilizando uma balança analítica e tiveram suas dimensões medidas através de um paquímetro digital. Cada amostra foi então colocada em um béquer cheio até a metade com uma solução de água e cloreto de sódio. Para a amostra 1, utilizou-se uma solução 0.26 mol/L e para amostra 2, 0.86 mol/L. Ambos os conjuntos foram inseridos numa bomba de vácuo. Programou-se a bomba para um intervalo de saturação de 20 minutos a uma pressão de 2 milibar. A seguir, adicionou-se mais solução a cada conjunto até que o nível estivesse um pouco abaixo do topo da amostra e programou-se a bomba novamente com os mesmos parâmetros anteriores. Finalmente, encheu-se cada béquer com solução até que toda a

amostra ficasse submersa e programou-se a bomba para mais uma saturação a 2 milibar por mais 20 minutos.

Determinação das densidades globais e das saturações

Com as medidas obtidas pelo paquímetro digital e pela balança analítica, foi possível calcular o volume total (V_t) e as densidades globais.

$$\rho_b = \frac{P}{V_t} \cdot (4)$$

Onde P é o peso de cada amostra.

Ao longo do experimento, as mudanças nos pesos das amostras foram medidas com a balança analítica, possibilitando assim o cálculo das saturações (S_w).

$$S_w = \frac{P - P_{dry}}{P_{sol}} \cdot (5)$$

Onde P_{dry} é o peso da amostra seca e P_{sol} é o peso da solução na amostra totalmente saturada.

Determinação das velocidades das ondas elásticas.

A aquisição dos valores de velocidade das ondas acústicas foi feita através de medidas ultra-sônicas. Este método consiste na colocação da amostra entre dois transdutores ultra-sônicos, um transmissor e um receptor, como mostra a Figura 1. O pulso sísmico gerado pelo transdutor viaja através da rocha e chega ao receptor, onde é registrado seu tempo de trânsito e sua forma de onda (figura 2). Através desse valor, é possível calcular a velocidade da onda longitudinal pela equação:

$$V_p = \frac{L}{T} \cdot (6)$$

Onde, L é o comprimento da amostra e T é o tempo de trânsito.

A relação de Han (Han,1986) fornece o valor da velocidade da onda cisalhante através da equação (7)

$$V_s = 0.794V_p - 0.787 \cdot (7)$$

Onde V_s é dada em Km/s.

O equipamento utilizado para o registro dos tempos de trânsito foi uma unidade PUNDIT (Portable Ultra-sonic Non-Destructive Integrity Tester) montado no arranjo mostrado na Figura 3 e que gera ondas P a uma frequência central de 54Khz, ligado a um osciloscópio para a gravação das formas de onda. Para melhorar o acoplamento, exerceu-se uma pressão equivalente ao peso do transmissor somada a um halter de 10 kg sobre a amostra e utilizou-se folhas de alumínio nas interfaces transdutor-amostra e para a calibração do equipamento utilizou-se um cilindro de alumínio como referência.

Após a saturação, cada amostra foi pesada e colocada entre os transdutores para o registro de seus tempos de trânsito e logo após foram colocadas em processo de secagem evaporativa em condições ambiente. Sendo os processos de pesagem e registro de tempo de trânsito, repetidos em intervalos regulares, inicialmente de 30

minutos e posteriormente de 60 minutos, durante um período de cinco dias.

Resultados

As tabelas 1 e 2 sumarizam os valores de ρ_b , V_p e S_w , medidos experimentalmente para as amostras 1 e 2, respectivamente.

Saturação (%)	Vp (Km/s)	Densidade (g/cm ³)
100	2.736	2.309
93.541	2.678	2.295
90.669	2.657	2.290
84.528	2.583	2.277
79.958	2.519	2.267
76.795	2.453	2.261
71.891	2.293	2.251
66.252	2.267	2.239
63.422	2.233	2.233
58.882	2.252	2.224
56.415	2.267	2.219
54.177	2.252	2.214
51.406	2.242	2.208
47.664	2.233	2.201
44.255	2.223	2.193
34.342	2.267	2.173
33.637	2.272	2.171
31.259	2.303	2.167
29.253	2.395	2.162
27.027	2.435	2.158

Tabela 1- Dados experimentais da amostra 1

Saturação (%)	Vp (Km/s)	Densidade (g/cm ³)
100	2.736	2.309
93.541	2.678	2.295
90.669	2.657	2.290
84.528	2.583	2.277
79.958	2.519	2.267
76.795	2.453	2.261
71.891	2.293	2.251
66.252	2.267	2.239
63.422	2.233	2.233
58.882	2.252	2.224

56.415	2.267	2.219
54.177	2.252	2.214
51.406	2.242	2.208
47.664	2.233	2.201
44.255	2.223	2.193
34.342	2.267	2.173
33.637	2.272	2.171
31.259	2.303	2.167
29.253	2.395	2.162
27.027	2.435	2.158

Tabela 2- Dados experimentais da amostra 2.

Os valores da velocidade da onda P e da densidade global medidos estão de acordo com os fornecidos pela literatura (Tiab et. al, 2004).

As figuras 4 e 5 apresentam gráficos de $V_p \times \rho_b$ para cada uma das amostras de arenito Berea. Como pode ser observado, nas curvas representativas à Lei de Garner há uma dependência linear da densidade em relação a velocidade. Ambos os gráficos mostram uma distância satisfatória entre os valores experimentais e aqueles calculados pela lei de Gardner, entretanto, a amostra 1 apresentou uma maior aproximação entre tais curvas. Com os coeficientes utilizados, os valores preditos pela Lei de Gardner não correspondem aos valores observados. Possivelmente, existem valores diferentes dos coeficientes que possam fazer com que os preditos se aproximem dos valores observados na região mais linear da curva: ($\rho_b = 2,24-2,31 \text{ g/cm}^3$) para a amostra 1 e ($\rho_b = 2,30-2,36 \text{ g/cm}^3$) para a amostra 2, porém para os demais valores de ρ_b , esta linearidade deixa de corresponder aos valores observados.

As figuras 6 e 7 mostram o comportamento da velocidade em função da saturação de água para os valores experimentais e aqueles propostos pela fórmula de Biot – Gassman, considerando os limites de Reuss e Voigt. Como podemos observar em ambas as amostras os valores experimentais e os obtidos pela equação (2) apresentam-se mais próximos.

Outro fato interessante é que tanto para a amostra 1 quanto para a amostra 2, a curva da velocidade contra a saturação exibe o mesmo comportamento para as duas formas de obtenção da velocidade. Tal fato já foi descrito por Wyllie (Wyllie et. al., 1951), onde ele afirma que, para os arenitos, a velocidade cai bruscamente entre saturações de 100% e 70%, permanece sensivelmente constante entre 70% e 10% e depois se torna irregular

Conclusão

Estes experimentos tiveram êxito em se entender as relações entre a velocidade da onda P e a saturação de

água e a densidade global. Embora a razão entre o comprimento de onda e o diâmetro das amostras estejam discrepantes das recomendações da ASTM, os resultados foram bons. Entretanto, os efeitos de ondas de superfície e de ondas PS podem estar influenciando os resultados. Novos experimentos, utilizando frequências maiores e conseqüentemente, visando-se a obedecer aos critérios da ASTM, estão programados.

Agradecimentos

Ao LENEP/UENF pela infra-estrutura disponibilizada, a Alexandre Sérvulo pela cessão das amostras, a CNPQ pelo patrocínio do projeto, a Luiz G. de Abreu e Remilson Rosa pelo apoio nos experimentos.

Referências

Ceia, M. e Missagia, R., 2009. Medidas ultrassônicas em amostras de arenitos naturais e sintéticas.

Djebbar, T and Erle, C. D. Petrophysics : theory and practice of measuring reservoir rock properties and fluid transport- 2nd ed.

Gardner, G.H.F., Gardner, L.W., and Gregory, A.R., 1974. Formation velocity and density – The diagnostic basics for stratigraphic traps. *Geophys.*, 39, 770-780.

Goertz, D., and Knight, R., 1998. Elastic wave velocities during evaporative drying. *Geophysics*, 63, 171-183.

Mavko, , Mukerji, and Dvorkin, 1998, The rock physics handbook—Tools for seismic analysis in porous media: Cambridge, U.K., Cambridge University Press, 329 p.

Wyllie, M.R.J., Gregory, A.R., and Gardner, L.W., 1956, Elastic wave velocities in heterogeneous and porous media: *Geophysics*, v. 21, p. 41–70.

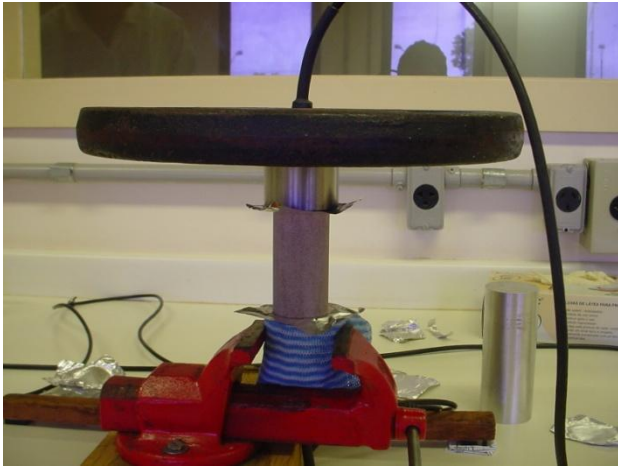


Figura 1- Arranjo experimental

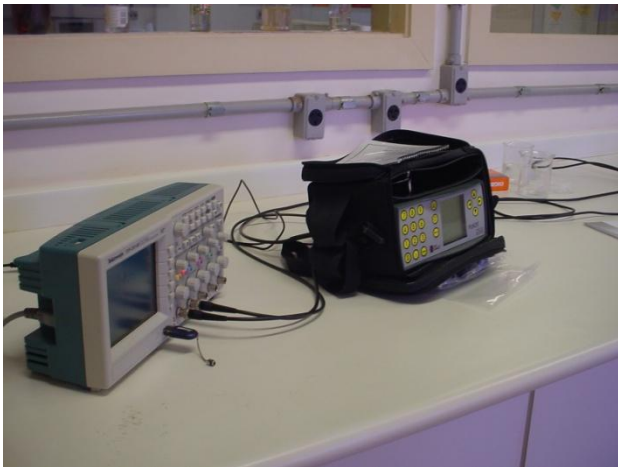


Figura 2- Osciloscópio e PUNDIT (esquerda)

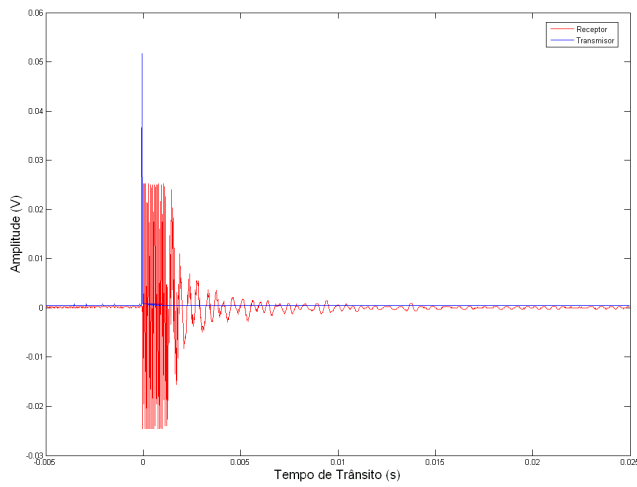
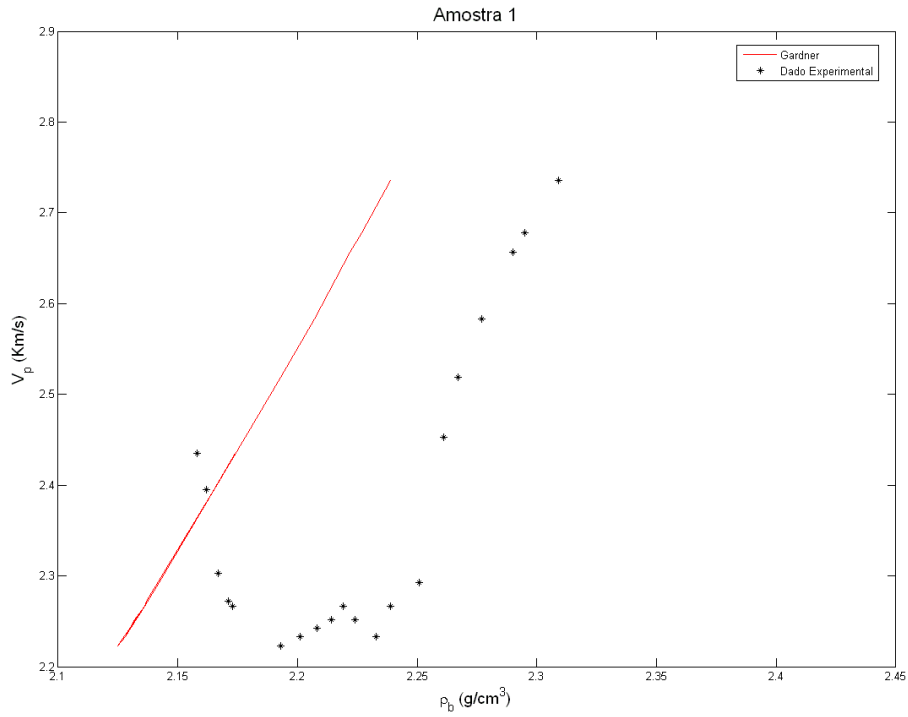
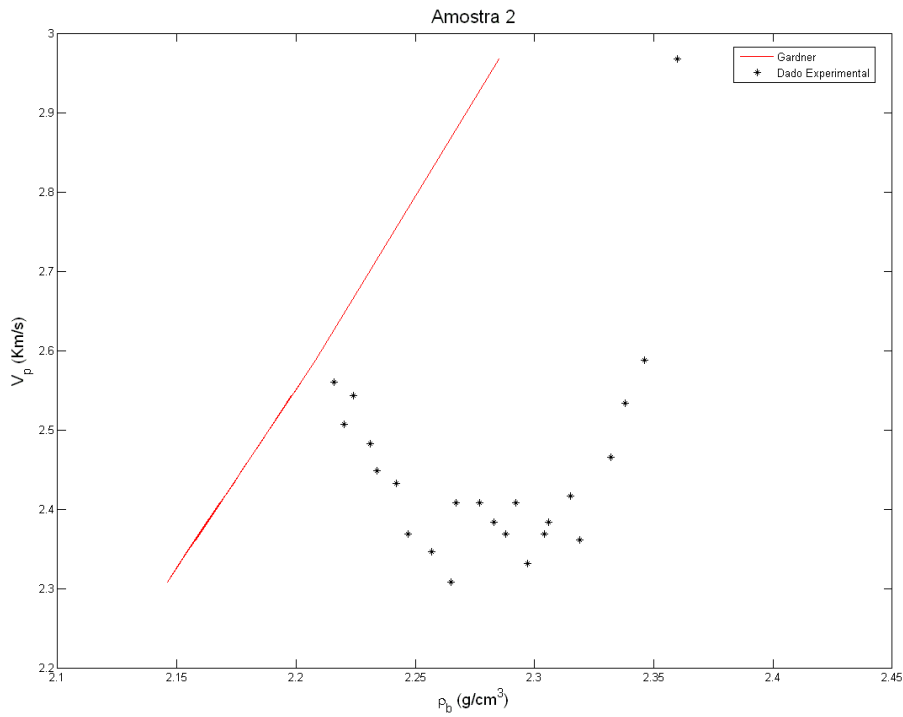


Figura 3- Forma de onda

Figura 4- Gráfico da densidade global *versus* a velocidade para amostra 1Figura 5- Gráfico da densidade global *versus* a velocidade para amostra 2.

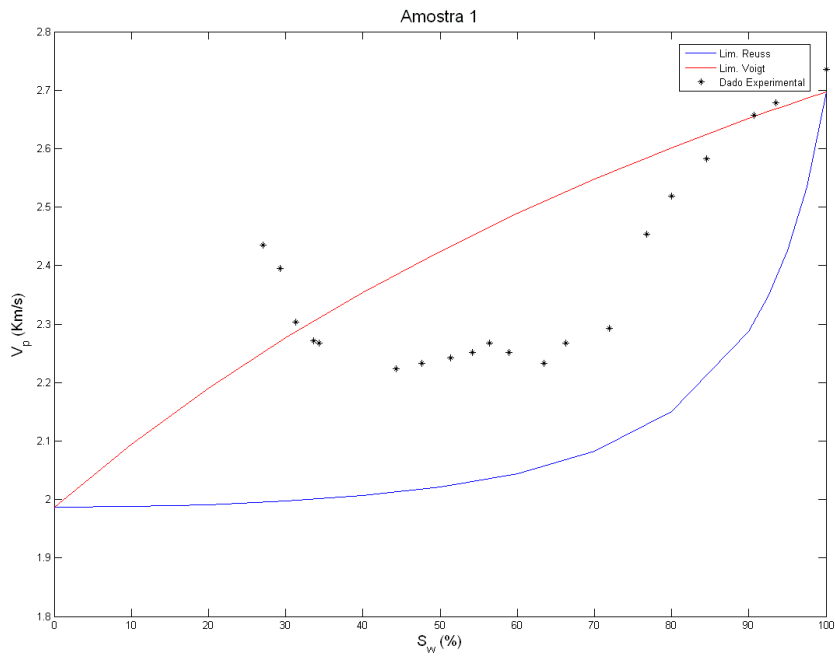


Figura 6- Gráfico da saturação de água versus velocidade para amostra 1.

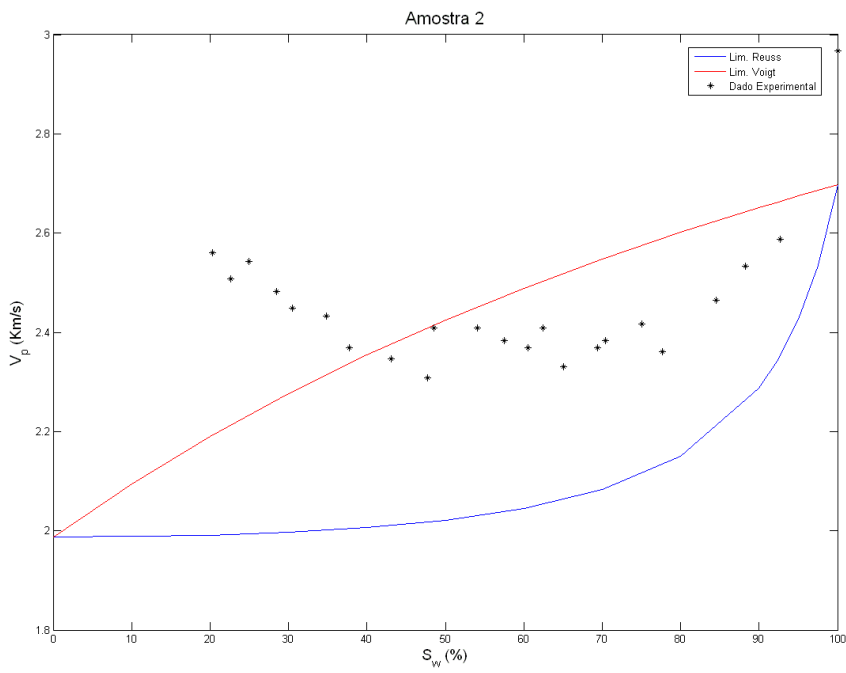


Figura 7- Gráfico da saturação versus velocidade para amostra 2