



Estimativa da velocidade de onda cisalhante através de regressão multivariada

Rafael de A. Silva, Marco A. R. de Ceia, Roseane M. Missagia, Irineu Lima Neto. Laboratório de Engenharia e Exploração de Petróleo (LENEP) – Universidade Estadual do Norte Fluminense (UNEF)

Copyright 2016, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

Este texto foi preparado para a apresentação no VII Simpósio Brasileiro de Geofísica, Ouro Preto, 25 a 27 de outubro de 2016. Seu conteúdo foi revisado pelo Comitê Técnico do VII SimBGf, mas não necessariamente representa a opinião da SBGf ou de seus associados. É proibida a reprodução total ou parcial deste material para propósitos comerciais sem prévia autorização da SBGf.

Abstract

Due to the advance in the exploration of sedimentary rocks, mainly in carbonate rocks, the understanding of the reservoir behavior becoming extremely important within the oil industry. In this paper, the relationship between the petrophysical properties of the rocks and the external pressure is analyzed using a multivariate analysis in order to determine models that account for such pressure-dependence in carbonate rocks.

Introdução

As rochas carbonáticas são importantes reservas de hidrocarbonetos com texturas complexas e propriedades petrofísicas (porosidade e permeabilidade) resultantes principalmente de processos diagenéticos. Estima-se que tais rochas compreendam mais que 60% das reservas de óleo do mundo. Logo, o conhecimento das propriedades mecânicas destas rochas torna-se de fundamental importância para a realização de operações relacionadas à indústria do petróleo (ASSEFA et. al., 2011). As propriedades das rochas sofrem alterações quando submetidas a pressão de confinamento externa. Em geral, as velocidades acústicas tendem a aumentar e a porosidade tende a diminuir. Portanto, a pressão de confinamento é um parâmetro importante a ser considerado no estudo das propriedades mecânicas das rochas. A caracterização das rochas traz informações relevantes para a previsão do comportamento do reservatório e avaliação dos cenários de produção, contribuindo para mitigar problemas durante a produção (LIMA NETO et al., 2011).

Este trabalho visa comparar diversos métodos empíricos de obtenção de velocidade da onda cisalhante (V_s) a partir de regressões lineares simples e multivariadas com outras propriedades, tais como: porosidade e velocidade da onda compressional (V_p).

Metodologia

Este trabalho está baseado nos dados apresentados em Ceia et al. (2015), sendo realizadas duas análises: 1) análise da relação entre as velocidades elásticas e a porosidade em rochas submetidas a pressão externa; 2) análise multivariada com velocidade de onda compressional (V_p), velocidade de onda cisalhante (V_s) e porosidade (Φ).

Segundo Viali (2002), uma análise multivariada consiste em qualquer método estatístico que analisa múltiplas variáveis simultaneamente.

A Regressão Linear Múltipla é utilizada para a predição de valores de uma ou mais variáveis de resposta (dependentes) a partir de diversas variáveis preditas ou independentes (JOHNSON; WICHERN; 2002), objetivando prever mudanças nas variáveis dependentes. Conforme Henriques (2011), o modelo de regressão linear múltipla é dado pela equação 1.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \dots + \beta_k X_k + E \quad (\text{equação 1})$$

em que:

Y é a variável dependente ou explicada (aleatória);

X_1, \dots, X_k são as variáveis independentes ou explicativas (não aleatórias);

β_0, \dots, β_k são parâmetros desconhecidos do modelo (a estimar);

E é a variável aleatória residual na qual se procuram incluir todas as influências no comportamento da variável Y que não podem ser explicadas linearmente pelo comportamento das variáveis X_1, \dots, X_k e os possíveis erros de medição.

Resultados

No presente trabalho foram realizadas as seguintes análises: Velocidade de onda primária x pressão de confinamento, velocidade de onda secundária x pressão de confinamento, e porosidade x pressão de confinamento. As amostras, estudadas em Ceia et al. (2015) foram: AC-001, DP-001, EW-002, EY-002, IL3-001, SD-002 e W-001.

Foi aplicada a regressão multivariada para estimar a velocidade de onda cisalhante (V_s) a partir da velocidade de onda primária (V_p) e a porosidade (Φ) levando em consideração o aumento de pressão externa.

Os resultados das estimativas de V_p podem ser vistos nas equações 2-8 para todas as amostras e sua correlação R^2 .

Amostra AC-001

$$V_s = 0,56221 V_p + 0,035049 \phi - 0,81022 \quad (\text{equação 2}) \\ R^2 = 0,9322$$

Amostra DP-001

$$V_s = 0,60360 V_p + 0,029899 \phi - 0,84130 \quad (\text{equação 3}) \\ R^2 = 0,9440$$

Amostra EW-002

$$V_s = -0,18076 V_p - 0,20878 \phi + 8,9806 \quad (\text{equação 4})$$

$$R^2 = 0,9728$$

Amostra EY-002

$$V_s = 0,45428 V_p - 0,028260 \phi + 1,0131 \quad (\text{equação 5})$$

$$R^2 = 0,9528$$

Amostra IL3-001

$$V_s = 0,49035 V_p - 0,003770 \phi + 0,47215 \quad (\text{equação 6})$$

$$R^2 = 0,9965$$

Amostra SD-002

$$V_s = 0,48649 V_p + 0,022175 \phi - 0,078060 \quad (\text{equação 7})$$

$$R^2 = 0,9912$$

Amostra W-001

$$V_s = 0,43121 V_p - 0,098930 \phi + 1,2789 \quad (\text{equação 8})$$

$$R^2 = 0,9966$$

A tabela 1 mostra os resultados das equações para estimar V_s através de uma regressão simples. Com isso foi possível estimar V_s através de V_p somente e V_s através da porosidade das amostras.

Tabela 1: Estimativa de V_s através de regressão simples.

Amostra	Equações	R ²
AC-001	$V_s = 0,3399 V_p + 0,8734$ (eq. 9)	R ² = 0,8920
AC-001	$V_s = -0,04514 \phi + 3,229$ (eq. 10)	R ² = 0,6993
DP-001	$V_s = 0,4173 V_p + 0,6524$ (eq. 11)	R ² = 0,9224
DP-001	$V_s = -0,05679 \phi + 3,735$ (eq. 12)	R ² = 0,7409
EW-002	$V_s = 0,6162 V_p - 0,2545$ (eq. 13)	R ² = 0,8696
EW-002	$V_s = -0,1646 \phi + 6,9673$ (eq. 14)	R ² = 0,9679
EY-002	$V_s = 0,5234 V_p - 0,0113$ (eq. 15)	R ² = 0,9421
EY-002	$V_s = -0,1407 \phi + 5,8457$ (eq. 16)	R ² = 0,6724
IL3-001	$V_s = 0,4964 V_p + 0,3471$ (eq. 17)	R ² = 0,9963
IL3-001	$V_s = -0,2649 \phi + 9,4617$ (eq. 18)	R ² = 0,8529
SD-002	$V_s = 0,4707 V_p + 0,5852$ (eq. 19)	R ² = 0,9906
SD-002	$V_s = -0,5487 \phi + 17,448$ (eq. 20)	R ² = 0,8160
W-001	$V_s = 0,4652 V_p + 0,7037$ (eq. 21)	R ² = 0,9963
W-001	$V_s = -1,3239 \phi + 8,4622$ (eq. 22)	R ² = 0,9756

Discussão e Conclusões

Como esperado, a Figura 1 mostra que a medida que a pressão de confinamento aumenta, a porosidade diminui, em virtude do fechamento dos microporos ou poros menores. Nas regiões com menor porosidade as velocidades acústicas aumentam até atingir um estado constante, onde a pressão de confinamento provavelmente tenha fechado todos os microporos (Figura 2-Figura 3).

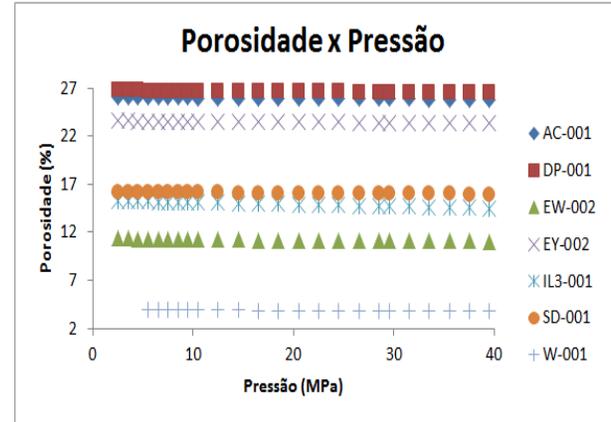


Figura 1: Gráfico de porosidade x Pressão de confinamento de todas as amostras.

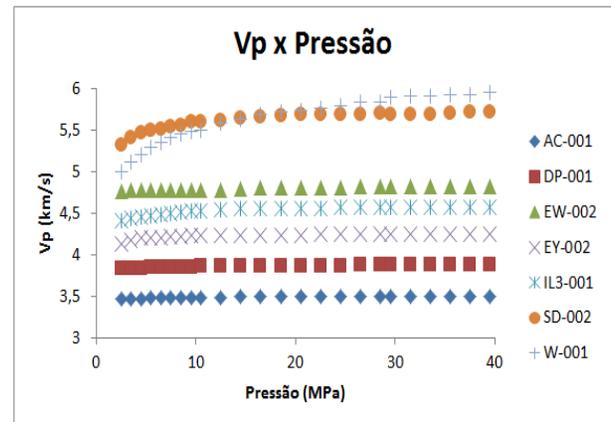


Figura 2: Gráfico de V_p x Pressão de todas as amostras.

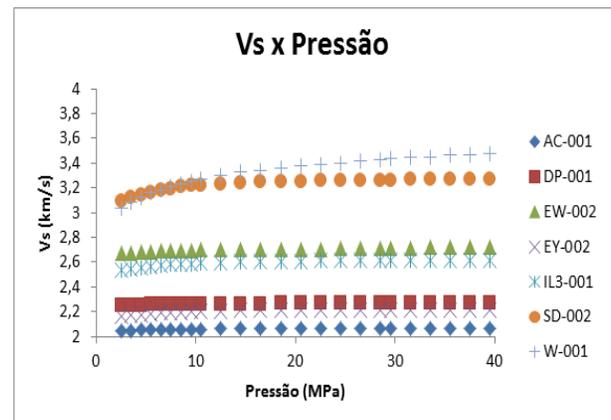


Figura 3: Gráfico de V_s x Pressão de todas as amostras.

Nota-se que depois de feita a regressão para estimar V_s , as correlações de R^2 ficaram melhores do que individualmente para cada amostra, como mostrado na tabela 1. Isso comprova que realmente há uma grande dependência entre esses parâmetros e que o modelo é válido.

Para comprovar a validade do modelo, pode-se observar nas figuras 5-11 que os valores de V_s medidos estão bem próximas dos valores de V_s calculados através da equações 2-8. Ainda foi utilizado os *crossplots* V_s em função de V_p , e V_s em função da porosidade versus a pressão que foram estimados através das equações 9-22. É interessante observar que o modelo proposto através de regressão múltipla teve melhores ajustes e os valores ficaram próximos.

Segundo Figueiredo et. al. (2014), devido a complexidade do sistema poroso das rochas carbonáticas, existe uma grande variação de tamanho e geometria de poros das amostras estudadas. A presença de microporosidades (figura 4) causam efeitos nas estimativas das velocidades compressoriais, no caso deste estudo, nas velocidades de ondas cisalhantes.

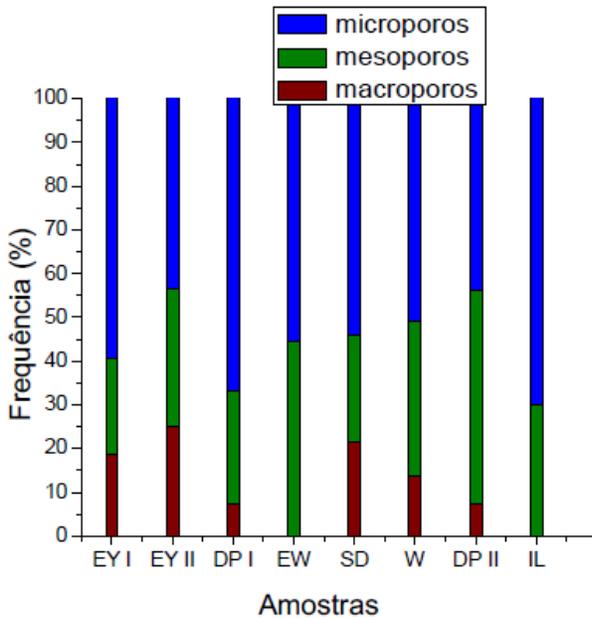


Figura 4: Quantidade de microporo, mesoporo e macroporo de cada amostra (FIGUEIREDO et. al., 2014)

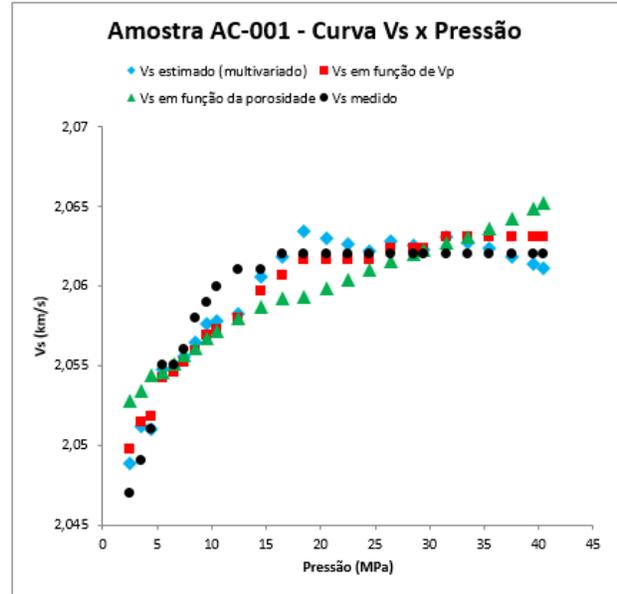


Figura 5: V_s versus Pressão para amostra AC-001.

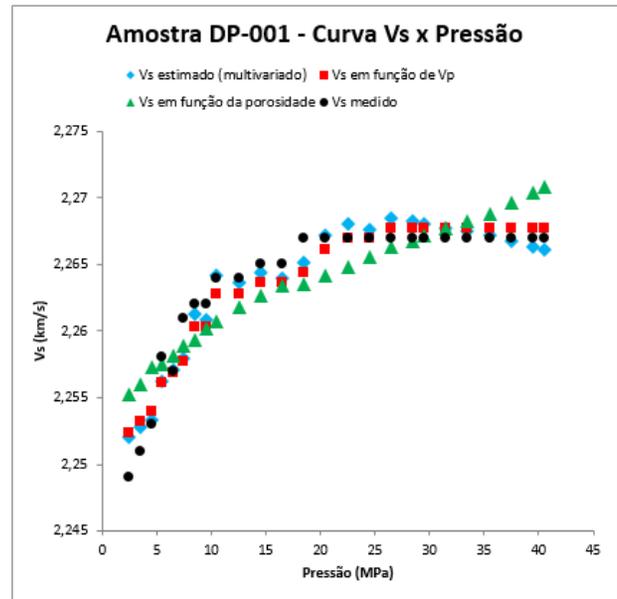


Figura 6: V_s versus Pressão para amostra DP-001.

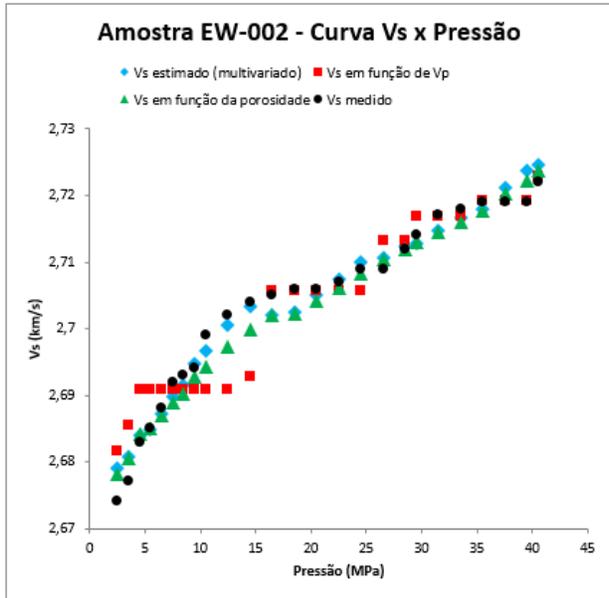


Figura 7: Vs versus Pressão para amostra EW-002.

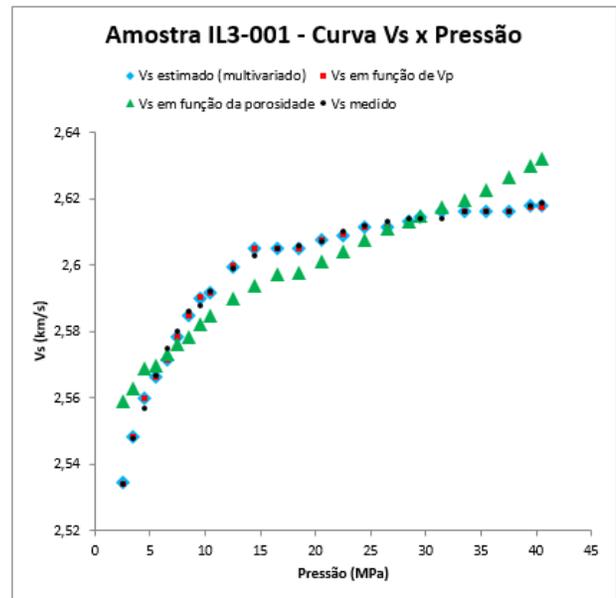


Figura 9: Vs versus Pressão para amostra IL3-001.

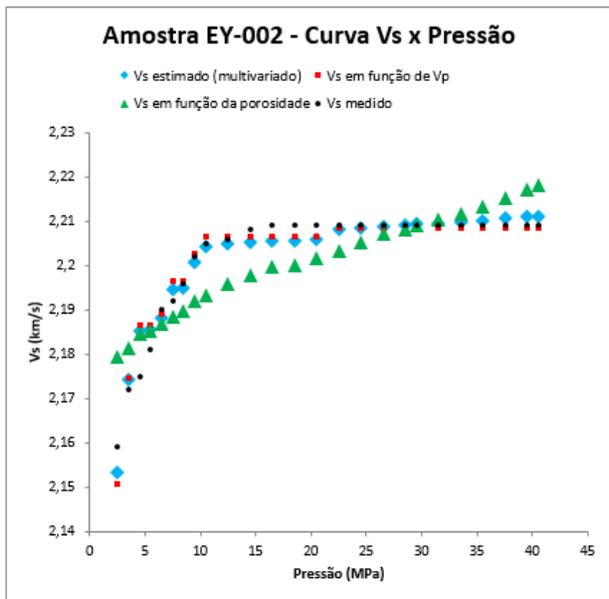


Figura 8: Vs versus Pressão para amostra EY-002.

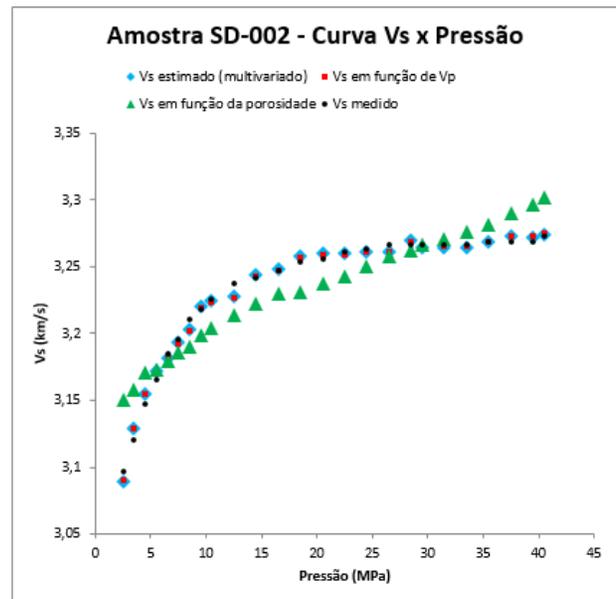


Figura 10: Vs versus Pressão para amostra SD-002.

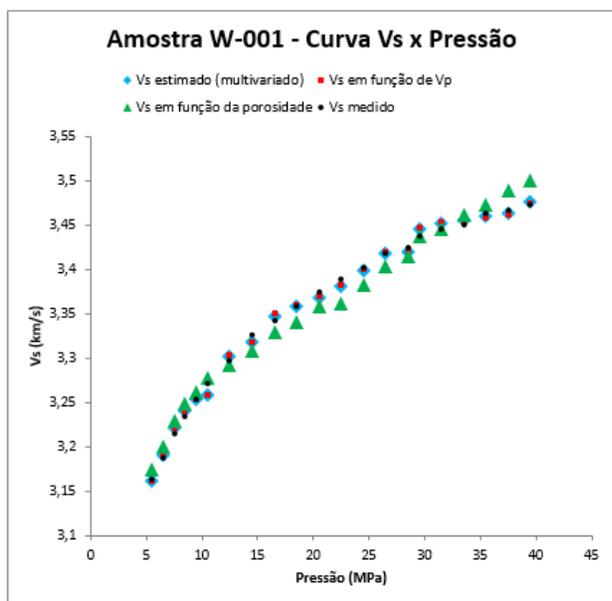


Figura 11: Vs versus Pressão para amostra W-001.

O trabalho abordou as relações de V_p , V_s e porosidade, a partir de dados retirados de Ceia et al., (2015) e constatou-se que realmente quando V_p e V_s foi analisado em relação a porosidade com uma variação de pressão, o resultado comportou-se conforme prediz a literatura.

A partir desses dados foi feita uma regressão múltipla, variando os parâmetros de porosidade e V_p , objetivando estimar V_s . Na aplicação da metodologia proposta é perceptível que as correlações de R^2 foram superiores quando comparadas com a metodologia simples de regressão. A implementação realizada no presente estudo possibilitou corresponder uma metodologia em que o desempenho se mostrou superior para estimativas de V_s . Além disso, verificou-se a existência de uma relação entre microporosidade e V_s - quanto maior o percentual de microporos presente nas amostras, maior será o efeito nas velocidades cisalhantes.

Agradecimentos

Os autores agradecem a UENF/LENEP por toda estrutura e provimento para o desenvolvimento deste trabalho, Capes pelo suporte financeiro.

Referências

ASSEFA, S.; MCCANN, C.; SOTHCOTT, J. Velocities of compressional and shear waves in limestones. *Geophysical Prospecting* 51, 1-13, 2011.

CEIA, M.; MISSÁGIA, R.; LIMA NETO, I.; BASTOS, A.; FIGUEIREDO, L.; OLIVEIRA, G. Comparison of static and dynamic pore compressibilities in carbonate rocks, 14th International Congress of the Brazilian Geophysical Society SBGf, 2015.

FIGUEIREDO, L.; MISSAGIA, R.; CEIA, M.; ARCHILHA, N.; LIMA NETO, I. Evaluation of pore system from outcrop rocks by mercury intrusion porosimetry. In: VI

Simpósio Brasileiro de Geofísica, 2014, Porto Alegre. VI Simbfg, 2014.

HENRIQUES, C. Análise de regressão linear simples e múltipla. Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu, 2011.

JOHNSON, R. A.; WICHERN, D. W. Applied multivariate statistical analysis. 5th ed. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice-Hall, 2002, 767 p.

LIMA NETO, I.A.; MISSÁGIA, R.M. . Modelagem Física de Rocha em carbonatos: análise do impacto da geometria de poros. In: 12th International Congress of the Brazilian Geophysical Society & EXPOGEF, 2011, Rio de Janeiro. 12th International Congress of the Brazilian Geophysical Society & EXPOGEF, Rio de Janeiro, Brazil, 15-18 August 2011, 2011.

SAYERS, C. M.; The elastic properties of carbonates. *The Leading Edge. Special Section: Carbonates*, pp 1020 – 1024, 2008.

VIALI, L. Introdução a Estatística multivariada, 1ªed. Rio Grande do Sul, 2002.