



Efeitos da porosidade e argilosidade nas velocidades de ondas compressoriais no arenito Namorado, Bacia de Campos, Brasil

Julio Kosaka de Oliveira*, IGEO/UFRJ, Brasil, jkolivei@uninet.com.br
Jorge Leonardo Martins, ON/MCT, Brasil, jlmartins@on.br

Copyright 2003, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica.

This paper was prepared for presentation at the 8th International Congress of The Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brazil, 14-18 September 2003.

Contents of this paper were reviewed by The Technical Committee of The 8th International Congress of The Brazilian Geophysical Society and does 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

The Namorado sandstone, which is a turbiditic oil-bearing reservoir in Campos basin, Brazil, can hardly be considered a clean (free of clay) porous rock. At least for the log interval studied in this work, the small extent of shaliness estimated for the Namorado sandstone exerts significant influence on P-wave velocities of the rock. Nevertheless, the acoustic character of the sandstone is predominantly influenced by the high porosity found in the interval. Local abrupt peaks are observed in the well-log data utilized for the study. These features, which are markedly noticed in the P-wave sonic log, are explained as influence of both the porous structure and the pore interconnections on the log readings.

Introdução

A partir do mapeamento das propriedades físicas das rochas, em conjunto com as observações em afloramentos, os métodos geofísicos corroboram na proposição de modelos para a geologia de subsuperfície. Entretanto, a despeito da resolução do método geofísico empregado na investigação, os resultados obtidos pela caracterização das rochas representam valores suavizados e pouco precisos. Nesse contexto, a escala de observação e a frequência de trabalho são os principais fatores utilizados para explicar os valores médios estimados no processo de caracterização da subsuperfície.

A validação dos resultados da caracterização das rochas por meio dos métodos geofísicos é, em geral,

efetuada a partir de dados de perfis de poços e/ou a partir de medidas obtidas em laboratório usando-se testemunhos. Os resultados são mais precisos nessa escala de investigação, pois ambas as metodologias lidam com informações pontuais obtidas a partir de bandas de frequência muito próximas. Os resultados adquiridos a partir dessas metodologias são, quase sempre, integrados ao método geofísico.

A título de exemplificação, considere a sísmica de exploração. Ao longo do processamento dos dados, a utilização de sismogramas sintéticos auxiliam, para fins de interpretação, a correlação dos eventos refletores nas seções sísmicas. Perfis de densidade e sônicos são empregados na construção desses sismogramas, ou seja, informações das variações daquelas propriedades no pacote sedimentar sob investigação são integradas ao processo convolucional (Yilmaz, 1987).

Inúmeros fatores contribuem para a variação das propriedades físicas das rochas. Entretanto, embora mais simplificados que os modelos físicos, os ajustes matemáticos corroboram para a análise de diversas dependências exibidas pelas propriedades das rochas. Considerando rochas reservatórios, sabe-se que a porosidade, a argilosidade, a pressão de poros e a pressão efetiva são os fatores mais influentes na variação das velocidades sísmicas (Miller e Stewart, 1990). Por exemplo, Han et al. (1986) estudaram a influência da porosidade e argilosidade no comportamento das velocidades compressoriais e cisalhantes a partir de ensaios ultrassônicos. Por outro lado, Eberhart-Phillips (1989) contabilizaram, além da porosidade e argilosidade, a influência da pressão efetiva sobre as velocidades sísmicas.

Na presente contribuição, procedimentos semelhantes são aplicados a dados de perfis geofísicos ao longo de um poço na bacia de Campos, Brasil. Esses dados foram cedidos, para fins didáticos, pela ANP (Agência Nacional do Petróleo, Brasil) às instituições de ensino e pesquisa brasileiras. O intervalo turbidítico estudado atravessa o arenito Namorado, que é produtor e comumente considerado um arenito limpo. Os efeitos da porosidade e argilosidade são

investigados, individual e simultaneamente, somente para as velocidades compressoriais, em virtude da ausência do perfil sônico de ondas cisalhantes no poço em questão. A metodologia utilizada segue as diretrizes do trabalho de Miller e Stewart (1990), que estudaram os efeitos daquelas quantidades em arenitos, folhelhos e litologias mistas. Entretanto, os autores desconhecem resultados de aplicação semelhante, executada no arenito Namorado, por pesquisadores de instituições de ensino e pesquisa brasileiras.

Velocidades de ondas compressoriais

A velocidade de propagação de ondas compressoriais, que é expressa em função dos parâmetros de Lamé (λ e μ) e da densidade do material por

$$V_P = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}}, \quad (1)$$

é uma propriedade fundamental de materiais elásticos. Uma análise da equação anterior induz à conclusão simplista de que as velocidades compressoriais dependem apenas da densidade e dos parâmetros λ e μ . Entretanto, a relação (1) é válida somente para materiais sólidos, não-porosos. Considerando rochas reservatórios, o parâmetro porosidade não pode ser descartado no estudo das variações de V_P . Adicionalmente, o preenchimento do espaço poroso por fluidos (água, óleo e/ou gás) altera significativamente o caráter acústico da rocha.

De fato, sabe-se que muitos são os fatores que afetam as velocidades sísmicas: profundidade, conteúdo de fluidos, fraturas, estado de tensões, porosidade, argilosidade, cimentação, compactação, pressão efetiva, pressão de poros, etc. Em geral, as velocidades aumentam com a profundidade de soterramento, mas porosidade e argilosidade são as quantidades que exercem papel vital na composição de uma rocha acumuladora de fluidos. A argilosidade encontra-se mais presente nas rochas selantes (geralmente folhelhos) e, reciprocamente, os reservatórios (geralmente arenitos) possuem pouca incidência de argila.

A porosidade também é afetada pela argilosidade, com reflexo direto nas velocidades sísmicas. Este último relacionamento, entretanto, é mais complexo, pois depende da maneira como a estrutura porosa se organiza, isto é, da geometria dos poros e da conexão entre eles, e de que forma a argila se encontra dispersa no espaço poroso (Archie, 1950).

Para o relacionamento $V_P \equiv f(\phi)$, duas simplificações típicas são utilizadas na prática. Uma é a equação de tempo médio de Wyllie et al.

(1956, 1958)

$$\frac{1}{V_P} = \frac{1 - \phi}{V_{ma}} + \frac{\phi}{V_f}, \quad (2)$$

que representa uma aproximação reconhecidamente válida para arenitos limpos com porosidade no intervalo $10\% < \phi < 25\%$ (Han et al., 1986).

Outra relação empírica, como em Wyllie et al. (1956) também deduzida a partir de interpretação de dados de perfilagem, é atribuída a Raymer et al. (1980)

$$V_P = (1 - \phi)^2 V_{ma} + \phi V_f. \quad (3)$$

Nas equações anteriores, V_{ma} representa a velocidade de ondas compressoriais na matriz rochosa, e V_f , no fluido contido no espaço poroso.

Os estudos de Han et al. (1986) sustentam que nenhuma das relações (2) e (3) podem ser aplicadas a arenitos sujos, isto é, que contenham algum percentual de argila disperso no arcabouço poroso da rocha. Isto porque, comprovam os autores citados, mesmo um pequeno percentual de argila na rocha provoca variações nas velocidades compressoriais.

Descrição dos dados

Na Figura 1 são mostrados os perfis, utilizados neste

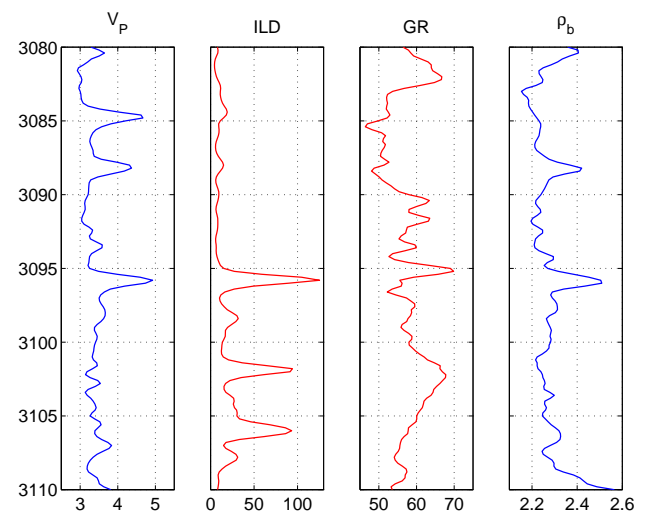


Figure 1: Perfis de velocidades compressoriais (V_P , em km/s), de resistividades (ILD, em ohm.m), raios gamma (GR, em unidades API) e de densidades (ρ_b , em g/cm^3). O comportamento do perfil de resistividades ILD indica presença de óleo no arenito. Profundidades em metros.

estudo petrofísico, para um intervalo do arenito Namorado. A densidade média do intervalo está em torno de $2,28 \text{ g/cm}^3$, e a velocidade média é aproximadamente $3,44 \text{ km/s}$.

Segundo Tigre e Lucchesi (1986), o arenito Namorado está inserido na formação Macaé superior, for-

mada no Cretáceo por correntes de turbidez. Trata-se de uma rocha produtora de óleo e, em geral, é caracterizada como pouco consolidada, possuidora de boa porosidade aparente (vide Figura 2) e mineralogia da matriz predominante quartzosa. No meio técnico, o arenito Namorado é considerado sem argilidade (limpo). No entanto, a Figura 2 mostra que, pelo menos neste intervalo sob investigação, o arenito dificilmente pode ser considerado limpo. A presença de argila na rocha, ainda que em percentuais pequenos (valor médio em torno de 7,10 %), pode influir significativamente nas variações das velocidades exibidas na Figura 1 (Han et al., 1986). Os resultados apresentados mais adiante confirmam a referida influência.

Uma análise da Figura 1 indica um leve crescimento das velocidades com a profundidade. Além disso, nota-se que as principais oscilações nas variações das propriedades encontram correspondência em cada perfil. Oscilações abruptas nas velocidades sugerem a presença de heterogeneidades locais no interior do arenito. Propõe-se explicar tais oscilações a partir do uso da metodologia descrita a seguir.

Metodologia

A metodologia utilizada para ajustar as velocidades no arenito Namorado envolveu procedimentos corriqueiramente adotados em interpretação de perfis de poços. As seguintes etapas compõem a metodologia:

1. Determinação da argilidade:

A argilidade foi calculada através da relação empírica

$$V_{\text{arg}} = 0.083 \left[2^{(3,70 \times I_{\text{GR}})} - 1, 0 \right], \quad (4)$$

que é adotada para o caso de arenitos pouco consolidados (Dresser Atlas, 1979). O índice de raios γ , I_{GR} , é, neste trabalho, determinado através do perfil de raios γ pela expressão

$$I_{\text{GR}} = \frac{\text{GR}_i - \text{GR}_{\text{are}}}{\text{GR}_{\text{flh}} - \text{GR}_{\text{are}}}, \quad (5)$$

onde GR_i é a medida do perfil. Os parâmetros GR_{are} e GR_{flh} correspondem às medidas mínima e máxima do perfil de raios γ tomadas no arenito e no folhelho, respectivamente, na mesma formação em estudo (Nery, 1990). Para o intervalo sedimentar em estudo, $\text{GR}_{\text{are}} = 45$ e $\text{GR}_{\text{flh}} = 100$, unidades API.

2. Determinação da porosidade efetiva:

O perfil de densidades foi utilizado para estimativa da porosidade efetiva corrigida pela argilidade, ϕ_{Dc} , segundo o manual Dresser Atlas (1979)

$$\phi_{\text{Dc}} = \frac{\rho_{\text{ma}} - \rho_{\text{b}}}{\rho_{\text{ma}} - \rho_{\text{f}}} - V_{\text{arg}} \frac{\rho_{\text{ma}} - \rho_{\text{sh}}}{\rho_{\text{ma}} - \rho_{\text{f}}}, \quad (6)$$

em que ρ_{b} representa uma medida do perfil de densidades. Para a densidade da matriz quartzosa que compõe o arenito Namorado, a densidade do óleo e a densidade do folhelho adjacente, foram assumidos os seguintes valores: $\rho_{\text{ma}} = 2,65 \text{ g/cm}^3$, $\rho_{\text{f}} = 0,75 \text{ g/cm}^3$ e $\rho_{\text{sh}} = 2,40 \text{ g/cm}^3$.

3. Aplicação das regressões lineares:

Para estudo da dependência das velocidades com as porosidades, $V_{\text{P}} \equiv f(\phi_{\text{Dc}})$, o ajuste dos dados foi executado com o seguinte modelo matemático (Han et al., 1986; Miller e Stewart, 1990)

$$V_{\text{P}} = a_0 \phi_{\text{Dc}} + a_1. \quad (7)$$

O ajuste dos dados para a dependência $V_{\text{P}} \equiv f(V_{\text{arg}})$ foi representado pelo modelo (Han et al., 1986; Miller e Stewart, 1990)

$$V_{\text{P}} = a_{01} V_{\text{arg}} + a_{02}, \quad (8)$$

enquanto que, para a dependência simultânea $V_{\text{P}} \equiv f(\phi_{\text{Dc}}, V_{\text{arg}})$, o modelo (Tosaya e Nur, 1982; Han et al., 1986)

$$V_{\text{P}} = a_{001} \phi_{\text{Dc}} + a_{002} V_{\text{arg}} + a_{003} \quad (9)$$

foi adotado para execução da regressão linear. Para cada um dos modelos acima, o coeficiente de correlação r entre os dados e os respectivos ajustes foi utilizado como medida da confiabilidade da regressão.

Resultados

De uma forma geral, uma hipótese simples para explicar a variação da porosidade com a argilidade pode ser formulada. Assumindo um relacionamento linear para ambas as quantidades, esperaríamos que a porosidade decrescesse com o aumento da argilidade. De fato, esse comportamento linear pode ser observado em diversos níveis dos perfis na Figura 2, onde a argilidade e a porosidade corrigida foram determinadas de acordo com as equações (4) e (6), respectivamente. Assumindo linearidade entre as duas grandezas, o ajuste aplicado aos dados fornece (vide Figura 3)

$$\phi_{\text{Dc}} = -0,0249 V_{\text{arg}} + 18,9106. \quad (10)$$

Para a regressão anterior, porosidade e argilidade estão em percentuais, e o coeficiente de correlação é $r = 0,025$. Certamente, a pobre correlação obtida no ajuste dos dados reflete a presença das bruscas oscilações observadas no perfil de velocidades. Por exemplo, duas marcantes oscilações de velocidades estão presentes entre 3080 m e 3090 m. A primeira oscilação corresponde a um decréscimo na argilidade com um aumento da porosidade, o que está de

acordo com a hipótese postulada acima. Por outro lado, a oscilação imediatamente abaixo mostra que, apesar da argilosidade se manter pequena, a porosidade diminuiu bruscamente com um correspondente pico na velocidade. Outro contra-exemplo é apresentado pelo intervalo entre 3100 m e 3110 m, onde nota-se um crescimento abrupto da argilosidade sem alteração na porosidade e velocidade médias.

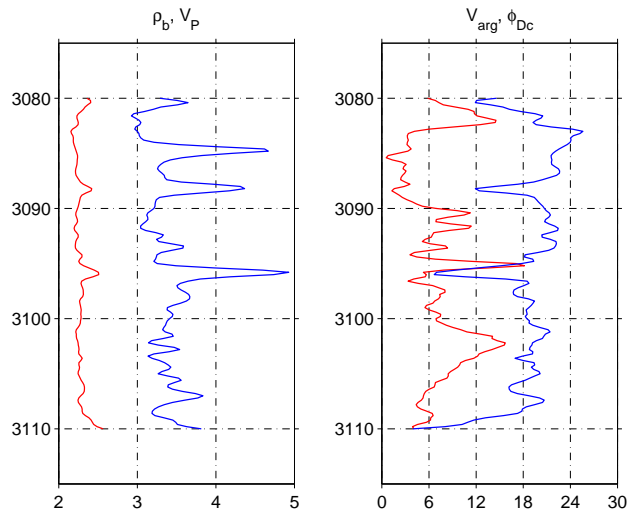


Figure 2: Perfis no intervalo do arenito Namorado escolhido para estudo: densidades ρ_b em g/cm^3 e velocidades compressoriais V_P em km/s ; argilosidade e porosidade percentuais. Porosidade e argilosidade médias no intervalo rochoso analisado estão em torno de 18,73% e 7,10%, respectivamente. Profundidades em metros.

As variações observadas acima, são atribuídos dois fatores. Primeiro, acredita-se que a estrutura porosa, isto é, a geometria e a forma de conexão dos poros, exerça uma forte influência nas leituras dos perfis, principalmente o perfil sônico (Archie, 1950). Outra possibilidade, refere-se à maneira como a argila se encontra dispersa na estrutura porosa. Por conta da baixa argilosidade média encontrada no intervalo rochoso analisado e das conclusões de Tosaya e Nur (1982), a influência desse último fator nas velocidades compressoriais parece ser menos relevante.

O comportamento das velocidades compressoriais em relação às variações de argilosidade e porosidade também estão exibidas na Figura 3. A análise visual do gráfico indica uma tendência linear nos relacionamentos $V_P \equiv f(\phi_{Dc})$ e $V_P \equiv f(V_{arg})$. Os ajustes lineares a seguir representam os relacionamentos mencionados. Para $V_P \equiv f(\phi_{Dc})$, o ajuste é representado por

$$V_P = -0,0496 \phi_{Dc} + 4,3663, \quad (11)$$

com coeficiente de correlação $r = 0,509$, e para $V_P \equiv f(V_{arg})$, a regressão linear fornece

$$V_P = -0,0304 V_{arg} + 3,6508 \quad (12)$$

com coeficiente de correlação $r = 0,316$. Usando-se os relacionamentos (11) e (12), obtém-se os gráficos da Figura 4. As velocidades são consideradas em km/s e argilosidade e porosidade em percentuais. Observa-se que, para o intervalo do arenito Namorado utilizado para estudo, a dependência das velocidades compressoriais com a argilosidade é levemente diferente se o relacionamento com a porosidade for levado em conta para fins de comparação. Esse aspecto confirma os resultados de Han et al. (1986), isto é, mesmo um pequeno percentual de argila em arenitos pouco consolidados provoca consideráveis variações nas velocidades compressoriais.

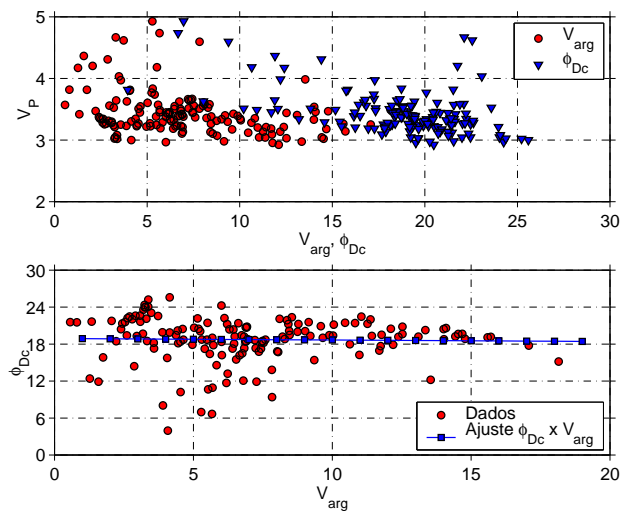


Figure 3: Acima: velocidades compressoriais contra porosidade e argilosidade. Abaixo: ajuste linear da porosidade em função da argilosidade, $\phi_{Dc} \equiv f(V_{arg})$.

Ainda na Figura 4, as aproximações de Wyllie et al. e Raymer et al., respectivamente expressas em (2) e (3), foram utilizadas para fins de comparação com o ajuste de velocidades em função da porosidade. Para tal, os seguintes dados para a velocidade na matriz quartzosa e no óleo, foram considerados com os respectivos valores: $V_{ma} = 5,70 \text{ km/s}$ e $V_f = 1,28 \text{ km/s}$. Em ambas as equações, ϕ foi substituído por ϕ_{Dc} para cálculo das velocidades. As curvas revelam que, no intervalo de porosidades $15\% < \phi < 25\%$, a equação de tempo médio de Wyllie et al. (1956) representa uma estimativa razoável para as velocidades compressoriais. Esse resultado confirma a validade imposta à equação de tempo médio para o intervalo de porosidades em questão. Por outro lado,

a equação de Raymer et al. (1980) conduz a um superestimativa das velocidades, confirmando as previsões de Han et al. (1986).

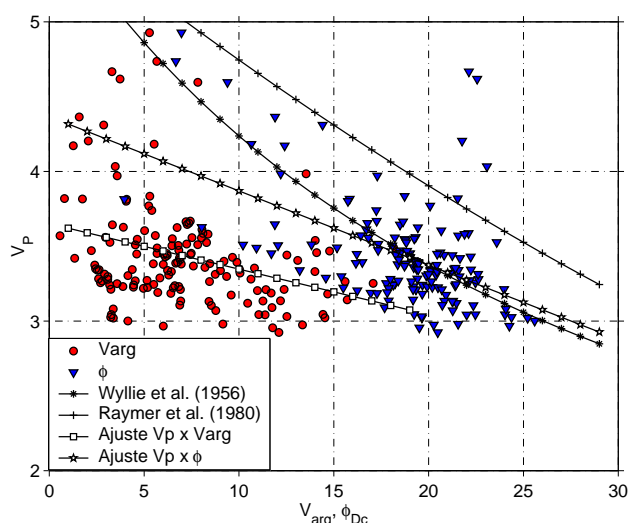


Figure 4: Ajustes lineares das velocidades compressonais em função da porosidade, $V_P \equiv f(\phi_{Dc})$, e da argilosidade, $V_P \equiv f(V_{arg})$.

A dependência das velocidades compressonais simultaneamente com a porosidade e a argilosidade também foi analisada no presente trabalho. O ajuste dos dados por meio do relacionamento em (9) conduz à seguinte expressão

$$V_P = -0,0505 \phi_{Dc} - 0,0316 V_{arg} + 4,6049, \quad (13)$$

com coeficiente de correlação $r = 0,606$. As velocidades foram consideradas em km/s, enquanto que porosidade e argilosidade, em percentuais.

O gráfico da Figura 5 exhibe o resultado da razão entre a curva obtida em (13) e os dados, V_{Pcalc}/V_{Pobs} . Nota-se que a dispersão apresentada pela razão, em relação à V_{arg} , é levemente maior que a dispersão em relação à ϕ_{Dc} . Essa leve diferença indica certa influência da argilosidade sobre as velocidades compressonais, confirmando, mais uma vez, as previsões de Han et al. (1986) para arenitos argilosos.

Conclusões

A argilosidade, ainda que presente em um percentual aparentemente insignificante no arenito Namorado, exerce relativa influência nas velocidades de ondas compressonais da rocha. Os maiores efeitos nas velocidades, no entanto, são provocados pela alta porosidade do arenito. Observa-se, em alguns níveis do reservatório, bruscas variações nas velocidades

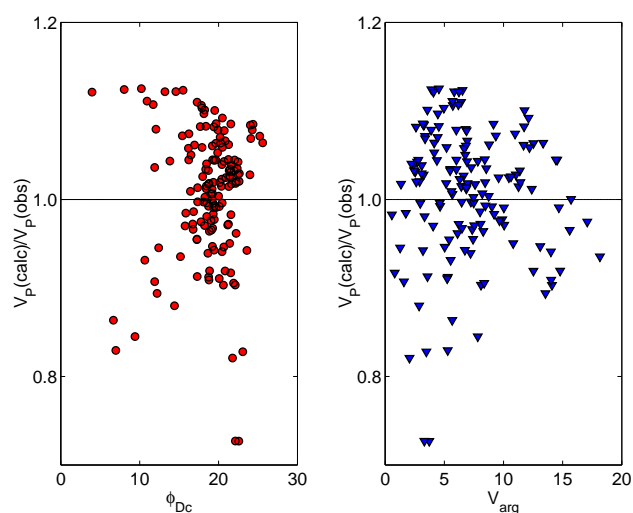


Figure 5: Ajuste linear das velocidades compressonais em função da porosidade e da argilosidade, $V_P \equiv f(\phi_{Dc}, V_{arg})$. Os gráficos exibem, individualmente, a razão V_{Pcalc}/V_{Pobs} em função da porosidade corrigida ϕ_{Dc} e da argilosidade V_{arg} .

compressonais. Tais variações parecem ser causadas não pela presença de argilosidade local – muito baixa, mas pela geometria do espaço poroso e/ou pela forma de conexão entre os poros da rocha. Diferentemente do que é assumido pela maioria dos intérpretes de perfis que já trabalharam com o arenito Namorado, esse reservatório, pelo menos no intervalo estudado, dificilmente pode ser classificado como um arenito limpo. Para fins de validação desses resultados preliminares e melhor entendimento dos efeitos da argilosidade e porosidade no reservatório, a metodologia utilizada nesse trabalho será estendida a outros poços no mesmo ambiente sedimentar.

Agradecimentos

Os autores agradecem o suporte da Coordenação da Área de Geofísica, Observatório Nacional, MCT, Brasil, no desenvolvimento do presente trabalho. Julio Kosaka de Oliveira possui atualmente uma bolsa de IC pelo PIBIC/CNPq-ON/MCT, processo no. 103.370/2003-0. A cooperação do Prof. José Agnelo Soares é aqui reconhecida.

Referências

- Archie, G. E., 1950, Introduction to petrophysics of reservoir rocks: Bull. Am. Ass. Petroleum Geol., 34, 943–961.
- Dresser Atlas, 1979, Log Interpretation Charts: Houston, Dresser Industries Inc., 107 p.
- Eberhart-Phillips, D., Han, D-H., and Zoback, M. D., 1989, Empirical relationships among seismic velocity, effective pressure, porosity, and clay con-

- tent in sandstone: *Geophysics*, **54**, 82–89.
- Han, D-H., Nur, A., and Morgan, D.**, 1986, Effects of porosity and clay content on wave velocities in sandstones: *Geophysics*, **51**, 2093–2107.
- Miller, S. L. M., and 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**, 94–103.
- Nery, G. G.**, 1990, Perfilagem geofísica em poço aberto: Notas de aula, CPGG/UFBA, 231 p.
- Raymer, D. S., Hunt, E. R., and Gardner, J. S.**, 1980, An improved sonic transit time-to-porosity transform: 21st Ann. Mtg. of the Soc. of Prof. Well Log Analyst, paper P.
- Tigre, C. A., e Lucchesi, C. F.**, 1986, Estado atual do desenvolvimento da Bacia de Campos e perspectivas. *In: Seminário de Geologia de Desenvolvimento e Reservatório, DEPEX-PETROBRAS*, Rio de Janeiro, 1–12.
- Tosaya, C., and Nur, A.**, 1982, Effects of diagenesis and clays on compressional velocities in rocks. *Geophys. Res. Lett.*, **9**, 5–8.
- Wyllie, M. R. J., Gregory, A. R., and Gardner, L. W.**, 1956, Elastic wave velocities in heterogeneous and porous media: *Geophysics*, **21**, 41–70.
- 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.
- Yilmaz, O.**, 1987, *Seismic Data Processing*: SEG Publication, Tulsa, OK, 535 p.