

Condutividade térmica a partir de perfilagem geofísica de poço.

Carlos Luciano C. de Jesus, Olivar A. L. de Lima, Roberto M. de Argollo, CPGG/UFBA.

Copyright 2005, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation at the 9th 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 9th 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, using self-similar mixture laws, we developed a set of analytical expressions to derive, explicitly, the thermal conductivity of granular sedimentary rocks, from measurements of the true electrical conductivity and porosity obtained from geophysical well logging. The developed equations were tested with well log data from oil fields in Recôncavo basin, and the averaged results are comparable to sample laboratory measurements made by Carvalho (1981).

Introdução

A operação de testemunhagem de um poço é extremamente demorada e de custo muito elevado. Por isso, as companhias exploração de petróleo restringem essas operações apenas aos intervalos de rochas reservatórios. A determinação do fluxo geotérmico e da história térmica de uma bacia pode ficar dificultada pela ausência de uma amostragem mais contínua e regular da sucessão litológica da bacia.

Felizmente, quase todos os poços de petróleo são perfilados geofisicamente e, na maioria das vezes, tais perfis são os únicos registros petrofísicos das litologias que os poços atravessam. Geralmente, uma operação de perfilagem inclui várias ferramentas, as quais realizam diferentes tipos de perfilagens. Com a facilidade de arquivamento permanente, esses perfis constituem registros eficientes e duradouros das propriedades físicas medidas no poço, podendo ser reinterpretados à luz de novos conhecimento geofísicos e geológicos, inexistentes na época de sua realização.

Neste trabalho, usando teorias de misturas granulares, auto-similares, distribuídas em fluidos contínuos, desenvolvemos um conjunto de expressões analíticas que se mostraram muito úteis para computar a condutividade térmica de rochas sedimentares clásticas a partir de dados de perfilagens elétrica e de porosidade medidos em poços. Para testar estas expressões, usamos perfis elétricos de poços exploratórios do campo petrolífero de Araçás, da bacia do Recôncavo-BA. Os valores médios para a condutividade térmica de arenitos argilosos, obtidos com essas equações, comparam-se satisfatoriamente, com medidas experimentais efetuadas

por Carvalho (1981) sobre testemunhos de poços correspondentes ao mesmo intervalo geológico.

Geologia da área de estudo

A bacia do Recôncavo, com uma extensão superficial emersa de 10.200 Km², é uma bacia intracratônica do tipo meio-graben, preenchida com sedimentos do Jurássico, do Cretáceo Inferior e do Tércio-Quaternário. A figura 1 mostra o mapa de situação da bacia, destacando-se a localização do campo petrolífero de Araçás, onde está incluídos os poços exploratórios utilizados neste trabalho. Os limites geográficos dessa bacia são colocados, arbitrariamente, à norte no Alto de Aporá, e ao sul na Ilha de Itaparica (Jesus, 2004).



Figura 1. Mapa de situação da bacia do Recôncavo. (Fonte: Sapucaia, 2001).

A unidade estratigráfica nos poços estudados é a da Formação Marfim que se constitui, predominantemente, de arenitos finos a siltitos, raramente grosseiros, cinza-claros a esverdeados, mal selecionados, com abundante matriz argilosa, fragmentos de carvão e de folhelhos, caoticamente distribuídos. Apresentam laminações, marcas de ondas e estruturas de escorregamento. Intercalados nos arenitos ocorrem siltitos e folhelhos. Os folhelhos são cinza-esverdeados, claros e escuros, localmente acastanhados, micáceos, calcíferos, localmente silticos. Apresentam partição acircular, podendo ser também maciços (Viana et al., 1971).

A bacia do Recôncavo constitui a terceira província petrolífera terrestre do País, estando em estágio avançado de exploração. Mais de 80 reservatórios de hidrocarbonetos acumulam reservas provadas de 6,8 x 10⁸ m³ de óleo e 3,0 x 10⁸ m³ de gás (Santos e Estrela Braga, 1990). Abriga, também, um dos mais importantes

aquíferos do Estado da Bahia, com uma reserva hídrica estratégica para uso das populações locais (Lima, 1999).

Fundamentos Teóricos

A condutividade térmica, a condutividade hidráulica ou permeabilidade e a condutividade elétrica de uma rocha, são propriedades físicas que obedecem à equações constitutivas lineares (leis de Joule, de Darcy e de Ohm) que, matematicamente combinadas à equação da continuidade, produzem as correspondentes equações geral de transporte de calor, fluido e cargas elétricas livres. Usando esta similaridade e os procedimentos construtivos de um modelo de arenito argiloso proposto por Lima e Sharma (1990, 1992), Jesus (2004) desenvolveu um conjunto de expressões para obter a condutividade térmica de rochas sedimentares granulares, a partir de dados de perfilações elétrica e de porosidade obtidos em poços. Deste modo, obteve a equação que determina a condutividade térmica

$$k_t = \frac{fk_w S_w^n}{1 + \frac{m}{m-1}(f-1)\frac{k_w S_w^n}{k_{cs}}} \quad (1)$$

onde k_t é a condutividade térmica da mistura, k_{cs} a condutividade térmica da matriz do arenito argiloso e k_w a condutividade térmica da água. S_w é a saturação em água do material, f um fator derivado do fator de formação de Archie (colocar a expressão $f = F$), m é o coeficiente de cimentação, e n o expoente de saturação o qual depende, essencialmente, da forma das gotas de óleo.

Do mesmo modo, a condutividade térmica da matriz do arenito argiloso (k_{cs}) é calculada através da expressão

$$k_{cs} = k_{sh} \left[\frac{2\sigma_{cs} k_{sh} + (2\sigma_{sh} - \sigma_{cs}) k_a}{2\sigma_{sh} k_{sh} + \sigma_{cs} k_a} \right], \quad (2)$$

onde k_a é a condutividade térmica do quartzo e k_{sh} e σ_{sh} são as condutividades térmica e elétrica dos folhelhos, respectivamente e σ_{cs} a condutividade elétrica da matriz do arenito.

O passo inicial no processo de conversão é determinar a resistividade da água (ρ_w) da formação, usando a equação (Nery, 1989)

$$\rho_w = \frac{\rho_{mf@FM}}{10^{-S_{sp}/K}}, \quad (2)$$

onde $\rho_{mf@FM}$ é a resistividade do filtrado da lama obtido à temperatura da formação, S_{sp} o valor da deflexão do SP a partir da linha base dos folhelhos, e K é um parâmetro que depende da natureza iônica da água da formação e da temperatura.

Uma vez determinada a resistividade da água, o passo seguinte é determinar o fator de formação (F) e a condutividade elétrica da matriz (σ_{cs}). Para isto, faz-se

uso dos dados das perfilações elétricas de indução e normal-curta, que constituem medidas de condutividade elétrica efetuadas com ferramentas de diferentes profundidades de investigação. A condutividade elétrica da zona lavada (σ_{xo}) é estimada pelo perfil elétrico – normal-curto (SN); esta zona é saturada com o filtrado da lama, de condutividade (σ_{mf}), geralmente medida em campo. A condutividade elétrica da zona virgem (σ_o) é estimada do perfil elétrico de indução; esta zona é saturada com o fluido nativo de condutividade (σ_w). Com esses dados e utilizando as equações de Lima (1999), calcula-se F e σ_{xo} como.

$$F = \frac{\sigma_{mf} - \sigma_w}{\sigma_{xo} - \sigma_o}, \quad (3)$$

e

$$\sigma_{cs} = \frac{\sigma_o F - \sigma_w}{m(F-1)}, \quad (4)$$

Com os valores de σ_{cs} , pode-se fazer estimativas da argilidade elétrica da formação (Lima, 1999). Para o valor de m usou-se $m = 1,8$, valor estimado pela PETROBRAS para o campo de Araçás.

Para as condutividades térmicas do quartzo e da água, usamos os valores tabelados de $7,69 \text{ W m}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ e $2,15 \text{ W m}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, respectivamente (Carvalho, 1981).

Em seguida, nas zonas de reservatórios, parte-se para calcular as saturações de óleo e de água. Como, através do processo de invasão, o filtrado da lama expulsa o óleo móvel da zona invadida e a condutividade térmica da água é quase cinco vezes maior que a do óleo, pode-se tomar a saturação de água da zona lavada (S_{xo}) praticamente igual a 1 e saturação de água na zona virgem (S_w) sendo obtida pela equação (Jesus, 2004),

$$S_w = \left[\frac{F\sigma_t - m(F-1)\sigma_{cs}}{\sigma_w} \right]^{1/n}, \quad (6)$$

onde n é igual a 2 (Nery, 1989).

Em todos essa computação foi utilizado o programa EXCEL da Microsoft obtendo-se, no final, a condutividade térmica das rochas sedimentares atravessadas pelos poços exploratórios estudados. As informações sobre resistividade do filtrado da lama (ρ_{mf} , em ohm.m) e da temperatura ambiente (T_{amb} , em $^\circ\text{F}$), foram disponibilizadas pela PETROBRAS.

Resultados

A figura 2 mostra os perfis elétricos, radioativo e sônico do poço AR-01. Diversos reservatórios arenosos aparecem indicados no intervalo de profundidade de 1150 – 1350 m. Entre 1360 – 1380 m tem-se um reservatório de água. É observado que nas zonas com hidrocarbonetos, a condutividade térmica varia entre 2,0 e $3,2 \text{ W m}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ e que esta variação deve-se a maior ou menor quantidade de argila na matriz da rocha

reservatório (figura 3). No perfil de condutividade térmica (figura 3), os espaços em branco (valores não representados porque os perfis elétricos não se ajustam a condição de separação por invasão) correspondem a zonas de folhelhos. Isso está bem indicado pelo perfil de raios gama (figura 2). Nas condições apontadas, a equação 1 não se aplica. Entretanto, verifica-se que existem zonas de folhelhos em que a equação 1 funciona bem, possivelmente por estes folhelhos estarem ligeiramente fraturados.

Os valores médio de condutividade térmica para arenitos obtidos neste trabalho comparam satisfatoriamente com aqueles medidos no laboratório por Carvalho (1981) para o campo de Araçás, na Formação Marfim conforme mostra a tabela 1. Nossos resultados também caem no intervalo representativo de arenitos argilosos, conforme descrito na literatura petrofísica (Jesus, 2004).

Tabela 1: Comparação entre a condutividade térmica determinada neste trabalho e por Carvalho (1981).

| Método | Condutividade Térmica ($W\ m^{-1}\ ^{\circ}C^{-1}$) | Campo |
|-------------------------------|--|--------|
| Condução transitória de calor | 2,48 | Araçás |
| Equação | 2,60 | Araçás |

Conclusão

O procedimento analítico desenvolvido mostrou-se perfeitamente factível para obter a condutividade térmica em função da resistividade elétrica, com base em dados de perfilagens geofísicas de poços. Portanto, os resultados obtidos para a condutividade térmica são satisfatórios quando comparados com o obtido por Carvalho (1981).

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CPGG/UFBA pelo ambiente favorável a execução do trabalho, à PETROBRAS-CENPES e a FINEP pelo liberação dos dados de poços e financiamento ao projeto GEOTERM, ao CNPq e ANP, pelo apoio logístico e financeiro na forma de bolsas de pós-graduação e de produtividade em pesquisa.

Referências

Carvalho, H. S. (1981) Método para determinação de fluxo geotérmico com aplicação às bacias sedimentares petrolíferas do Recôncavo baiano (Brasil) e Sumatra (Indonésia), Tese de Doutorado, Universidade Federal da Bahia.

Jesus, C. L. C. (2004) Determinação da condutividade térmica de rochas sedimentares a partir de perfilagem elétrica de poços, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal da Bahia.

Jesus, C. L. C.; Lima, O. A. L., Argollo, R. M. e Romero, P. A. (2004) Desenvolvimento de perfil de condutividade térmica a partir de perfis elétricos. Rio Oil & Gas Expo. and Conference, Res. Exp., IBP066_04. Cd-rom.

Lima, O. A. L. and Sharma, M. M. (1990) A grain conductivity approach to shaly sandstones, *Geophysics*, **55**: 1347-1356.

Lima, O. A. L. and Sharma, M. M. (1992) A generalized Maxwell-Wagner theory for membrane polarization in shaly sands, *Geophysics*, **57**: 431-440.

Lima, O. A. L. (1999) Caracterização hidráulica e padrões de poluição no aquífero Recôncavo na região de Camaçari – Dias D'Ávila, Tese de Professor Titular, Universidade Federal da Bahia.

Nery, G. G. (1989) Perfilagem geofísica de poços, Bol. Tec. PETROBRAS.

Santos, C. F. e Estrela Braga, J. A. (1990) O estado da arte da bacia do Recôncavo, Bol. Tec. PETROBRAS, **4**: 35-43.

Viana, C. F.; Gama, Jr., E.G.; Simões, I. A.; Fonseca, J. R. e Alves, R. J. (1971) Revisão estratigráfica da bacia Recôncavo/Tucano, Bol. Tec. PETROBRAS, **14**: 157-192.

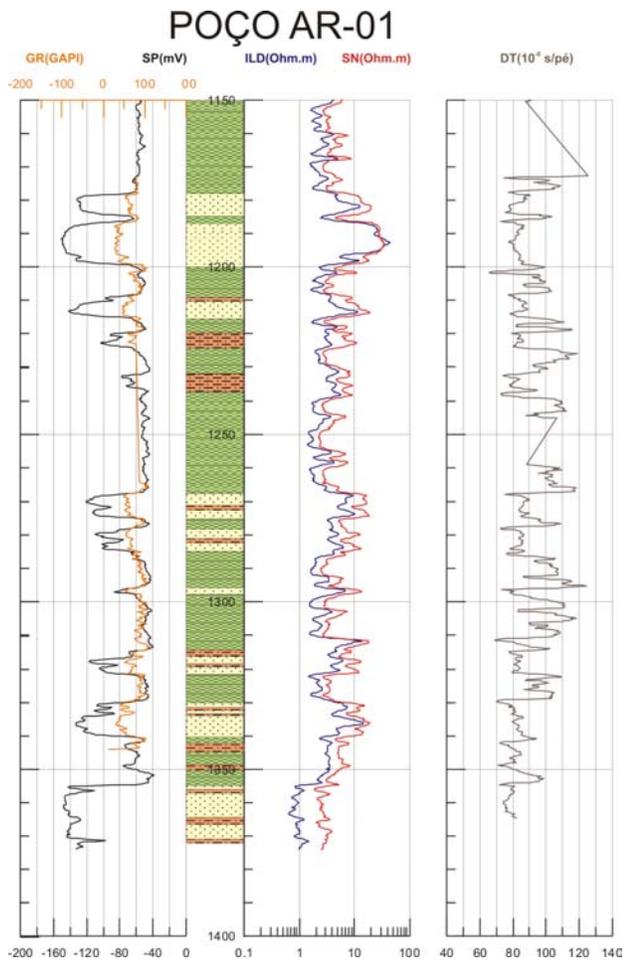


Figura 2: Perfis geofísicos do poço AR-01, no intervalo de profundidade de: 1150 – 1380 m.

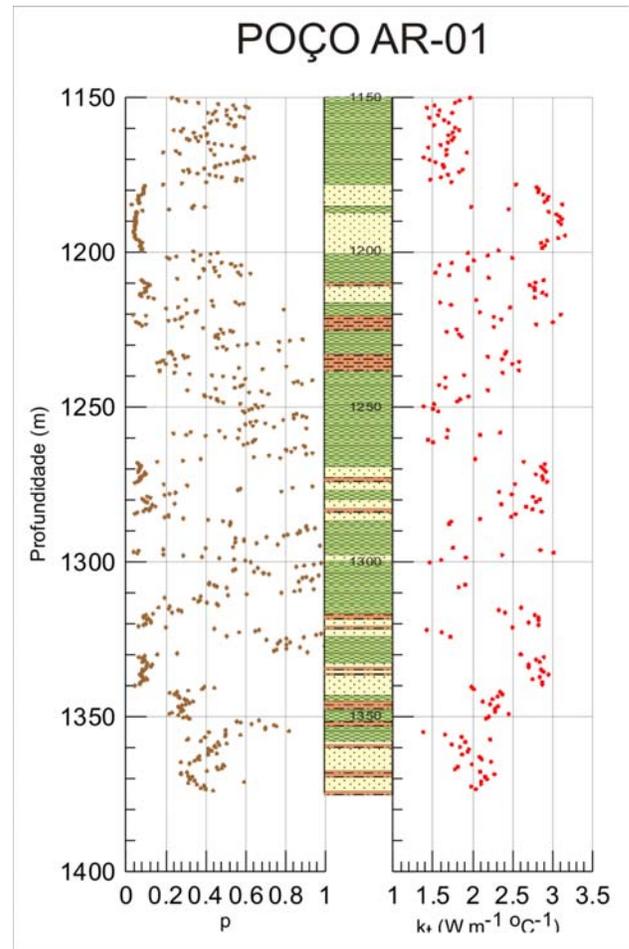


Figura 3: Perfis da proporção volumétrica da argila e da condutividade térmica ao longo do intervalo do poço AR-01.