

EQUIPAMENTO PARA ESTUDOS DE REDUÇÃO DE PERMEABILIDADE EM ARENITOS DEVIDO À PRECIPITAÇÃO QUÍMICA

Eudes S. Muniz¹ (PUC-Rio), Sérgio A. B. da Fontoura¹ (PUC-Rio), Adriano dos Santos² (LENEP/UENF),
Antônio Luiz S. de Souza³ (Petrobras)

¹Rua Marquês de São Vicente 225, GTEP, Ed. Padre Leonel Franca 6º andar – Gávea, Rio de Janeiro, Brasil,
CEP 22453 900 eudes@civ.puc-rio.br, fontoura@civ.puc-rio.br;

²Pesquisador Visitante, LENEP/UENF, Macaé, Brasil asantos@lenep.uenf.br

³Ilha do Fundão, quadra 7, prédio 20, Cenpes, Cidade Universitária, CEP 21949 900, alserra@petrobras.com.br

A técnica de reinjeção de água em poços injetores para manutenção da pressão dos reservatórios e deslocamento do petróleo em direção a poços produtores consiste num dos métodos de recuperação secundária amplamente utilizada na indústria do petróleo. Entretanto, dependendo da composição química da água injetada e da presente nos poros da formação, pode-se propiciar a precipitação de sais, tais como barita, celestita e carbonato de cálcio. A precipitação progressiva destes sais diminui a permeabilidade da formação gerando sérios problemas em campos que se utilizam desta técnica.

Neste trabalho é apresentado um equipamento onde é possível realizar ensaios de forma a entender o processo de precipitação e redução da permeabilidade em rochas reservatório como os arenitos (ensaios de entupimento). Neste equipamento é possível determinar o coeficiente de dispersão hidrodinâmica do meio poroso e a constante de reação em ensaios de injeção simultânea de soluções incompatíveis onde ocorre a precipitação de sais. A novidade na metodologia de realização dos ensaios consiste na técnica de medição de concentração de efluentes em tempo real, realizada por meio de um sensor de fibra óptica especialmente projetada para este fim. Ensaios em arenito Botucatu foram realizados percolando-se diferentes soluções salinas (NaCl, BaCl₂, Na₂SO₄ e NaCOOH e determinando-se o coeficiente de dispersão hidrodinâmica do meio poroso. Este parâmetro é determinado por retroanálise do ensaio de injeção utilizando-se o método dos mínimos quadrados através de um programa desenvolvido no ambiente MathCad 2001. Valores do coeficiente de dispersão hidrodinâmica na ordem de 1 a 3×10^{-8} m²/s foram obtidos para o arenito em questão.

Precipitação química, Arenitos, Ensaios de Laboratório.

1. INTRODUÇÃO

A técnica de injeção de água para manutenção da pressão dos reservatórios e deslocamento do petróleo em direção a poços produtores consiste no método de recuperação secundária mais utilizada na indústria do petróleo. Segundo Shecaira et al. (2002) a injeção de água é empregada em aproximadamente 74 % do petróleo produzido no Brasil. Entretanto, dependendo da composição química da água injetada e da presente nos poros da formação, podem-se propiciar a ocorrência de incrustações inorgânicas, tipicamente sulfatos de bário (barita) e estrôncio (celestita) e carbonato de cálcio. A precipitação progressiva destes sais diminui a permeabilidade da formação gerando sérios problemas em campos que se utilizam desta técnica.

Neste trabalho é apresentado um equipamento para estudos desta natureza onde é possível determinar o coeficiente de dispersão hidrodinâmica do meio poroso e a constante de reação em ensaios de injeção simultânea de soluções incompatíveis onde ocorre a precipitação de sais. Em função da quantidade de material disponível, decidiu-se limitar esta publicação à apresentação dos equipamentos e aos ensaios para determinação da dispersão hidrodinâmica do meio poroso. Ensaios de precipitação com a determinação da constante reacional estão em fase de análise e será objeto de publicações futuras.

2. EQUIPAMENTO UTILIZADO

O equipamento utilizado para estudos de redução de permeabilidade foi projetado para suportar pressões confinantes de até 69 MPa (10000 psi) e temperaturas de até 150 °C. O corpo da célula de injeção foi construído em aço inox e as partes em contato com os fluidos salinos em hastelloy. O corpo de prova cilíndrico com diâmetro de 38,1 mm (1,5") e comprimento de até 200 mm é colocado entre as faces de entrada e saída (caps) e envolvido por membrana de viton. A face de entrada é dotada de dois orifícios adjacentes que permitem a injeção simultânea de dois fluidos diferentes de forma que a mistura destes ocorra somente no interior do corpo de prova. A face de saída é dotada de um orifício para a coleta do fluido percolante (efluente). Anéis de viton (O´rings) são usados como elemento selante em todo o equipamento.

A Figura 1 apresenta a configuração dos equipamentos utilizada na realização dos ensaios. Um aplicador de pressão da marca GDS é responsável pela imposição e manutenção da pressão confinante sendo capaz de aplicar até 64 MPa (9400 psi). A circulação de fluido no sistema é realizada por intermédio de duas bombas Jasco modelo PU 2086i capazes de aplicar elevadas pressões e vazões variando de 0,001 a 20 ml/min. As partes em contato com as soluções salinas são confeccionadas em PEEK, material resistente à corrosão, dispensando desta forma a utilização de interfaces para injeção de fluido no sistema. As pressões atuantes no corpo de prova são medidas por transdutores tipo Validyne com capacidade de 21 MPa (3000 psi). Estes transdutores monitoram a pressão confinante aplicada e a pressão de fluido no corpo de prova.



Figura 1. Configuração dos equipamentos

O sistema de aquisição de dados utilizado é o AqDados para Windows versão 5.0 desenvolvido pela LYNX Tecnologia Eletrônica. A placa de conversão A/D possui 8 canais de entrada analógica, sendo 4 canais diferenciais e 4 canais simples. A placa possui resolução de 12 bits e a taxa de amostragem máxima é de 50 kHz/canal. Como software de controle e aquisição de dados, o AqDados 5.0 permite a visualização simultânea de até oito sinais durante um ensaio e suporta a coleta de até 32 canais analógicos de entrada, permitindo a configuração individual de cada canal (nome, unidade de grandeza física, faixa de entrada) e exportação dos dados adquiridos durante o ensaio em formato texto.

2.1 Sensor de Fibra Óptica

A técnica de medição da concentração salina por intermédio de um sensor de fibra óptica foi utilizada por Stampa (1999) e por Muniz (2003), respectivamente, nos Departamentos de Engenharia Mecânica e Civil da PUC-Rio. Nessa metodologia, a determinação da concentração salina de um líquido é baseada numa relação entre a mesma e o índice de refração da solução, obtida através do uso de uma fibra óptica imersa no líquido. A Figura 2 apresenta o circuito óptico básico utilizado.



Figura 2. Sistema óptico básico

Neste circuito, a luz emitida pelo LED (Diodo Emissor de Luz), de potência P_0 , é dirigida a um acoplador de duas entradas e duas saídas. Por uma dessas saídas, uma parte da luz, de potência P_r , chega a um fotodetector, dito de referência do circuito óptico, e o restante da luz chega à extremidade da fibra que se encontra imersa no fluido de interesse. A luz refletida na interface fibra-fluido, de intensidade P_s , retorna pela fibra, passa pelo

acoplador e é então detectada por outro fotodetector. As relações entre essas grandezas são definidas pelas seguintes expressões:

$$Ps = C_1 R_1 P_0 \quad (1)$$

$$Pr = C_2 P_0 \quad (2)$$

onde C_1 e C_2 são constantes que incluem perdas e razões de acoplamento existente no acoplador óptico.

Para se obter o índice de refração do fluido, inicialmente, se utiliza a razão entre as equações 1 e 2 para eliminar o termo P_0 e substituir a razão entre as constantes C_1 e C_2 , por uma outra constante K_1 que diz respeito ao acoplador. Desta forma, chega-se a equação 3. O segundo passo consiste na determinação desta constante que é obtida utilizando-se a refletividade de um meio de índice conhecido e pouco suscetível a perturbações, como a água, por exemplo. Dessa forma, o valor da constante K_1 é determinado pelas leituras das potências de referência (Pr) e do sinal refletido pela fibra óptica imersa neste meio conhecido (Ps). O coeficiente de refletividade ($R_{1\text{conhecido}}$) deste meio é obtido pela equação 4 onde n_1 e n_2 são os índices de refração do líquido (água = 1,333) e da fibra (1,476), respectivamente.

$$K_{1\text{Determinado}} = \frac{Ps / Pr}{R_{1\text{Conhecido}}} \quad (3)$$

$$R_{1\text{conhecido}} = \frac{(n_1 - n_2)^2}{(n_1 + n_2)^2} \quad (4)$$

Com a constante de acoplamento do sistema (K_1) determinada, a fibra pode ser imersa em qualquer outro fluido e a refletividade (R_1) do mesmo pode ser obtida pela equação 5, enquanto o índice de refração (n) do fluido é obtido pela equação 6 apresentada abaixo.

$$R_1 = \frac{Ps / Pr}{K_{1\text{Determinado}}} \quad (5)$$

$$n = \left[1,476 \frac{(1 - \sqrt{R_1})}{(1 + \sqrt{R_1})} \right] \quad (6)$$

Utilizando-se o sistema apresentado acima, ensaios de calibração foram realizados para obter a relação entre o índice de refração e a concentração para as soluções de NaCl, BaCl₂ e Na₂SO₄. Este ensaio consiste em determinar o índice de refração para concentrações conhecidas da solução de interesse e, por regressão linear obter a equação de calibração. A Figura 3 apresenta as curvas de calibração obtidas para os sais utilizados.

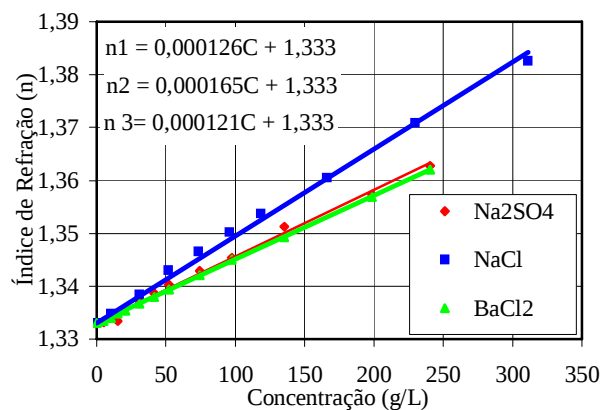


Figura 3. Curvas de calibração dos sais utilizados

3. ENSAIOS NA CÉLULA DE INJEÇÃO

Neste trabalho são utilizadas amostras de arenito Botucatu da região de Campinas. A formação Botucatu é caracterizada por um arenito eólico, presente em uma grande área da América do Sul, aflorando ao longo da bacia do Paraná, incluindo áreas do Brasil, Paraguai e Argentina.

3.1 Ensaio Variando a Vazão

O primeiro ensaio foi realizado de forma a mostrar o efeito do aumento da vazão de injeção no tempo necessário para a concentração máxima ser verificada no efluente. Foi utilizado um corpo de prova (CP) de diâmetro igual a 37,24 mm e comprimento de 149,30 mm. Este CP foi seco em estufa a 110 °C por 24 horas sendo posteriormente pesado (289,00 g), saturado a vácuo com água desmineralizada e pesado novamente (336,26 g). A diferença entre as duas pesagens (47,26 g), dividida pela densidade da água (1 g/cm³) resulta na quantidade de fluido absorvida pelo corpo de prova que é igual a 47,26 cm³. Como o volume de vazios é igual ao volume de água retido e sabendo-se que o volume total deste corpo de prova é de 160,21 cm³, tem-se que a porosidade deste material é igual a 29,5 %.

O fluido de circulação adotado para o ensaio foi uma solução de formiato de sódio (NaCOOH) a concentração de 86 g/l. Para a determinação da concentração do efluente foi utilizado um condutivímetro modelo MultiLine P3 pH/LF. A condutividade elétrica de uma solução é a medida da capacidade que esta solução possui de conduzir uma corrente elétrica. Quando se aplica uma voltagem nos pares do eletrodo da sonda, os cátions migram para o eletrodo negativo e os ânions para o eletrodo positivo, sendo a corrente gerada, medida e associada à concentração salina da solução. A curva de calibração obtida para o formiato de sódio é apresentada na Figura 4.

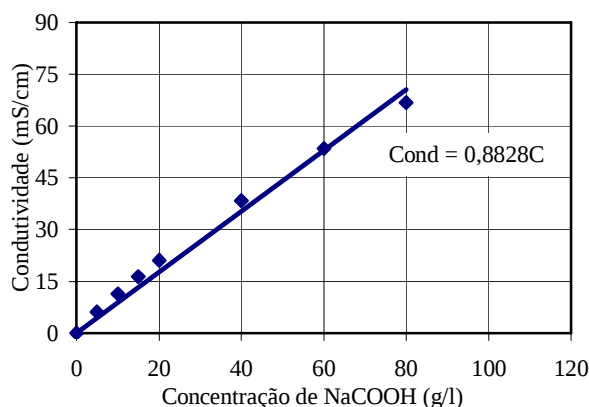


Figura 4. Curva de calibração do formiato de sódio

O CP utilizado foi submetido a 1,5 MPa de pressão confinante e a vazões de injeção de 0,6; 0,8; e 1,0 ml/min. O tempo de coleta de efluente em cada ensaio foi ajustado de acordo com a vazão adotada. Ao final de cada ensaio, água foi circulada a vazão de 0,5 ml/min até que no mínimo 10 volumes porosos (473 ml) tenham percolado o corpo de prova. A Figura 5 apresenta as curvas de concentração do efluente medida pelo condutivímetro para os ensaios realizados.

O principal inconveniente de se realizar as medidas de concentração utilizando um condutivímetro é a necessidade de se coletar um volume mínimo de 10 ml de efluente para realizar a análise. Isso faz com que a concentração obtida seja uma concentração média de um determinado intervalo de tempo. Outro ponto é a necessidade de acompanhamento do ensaio visto que a coleta não é automatizada.

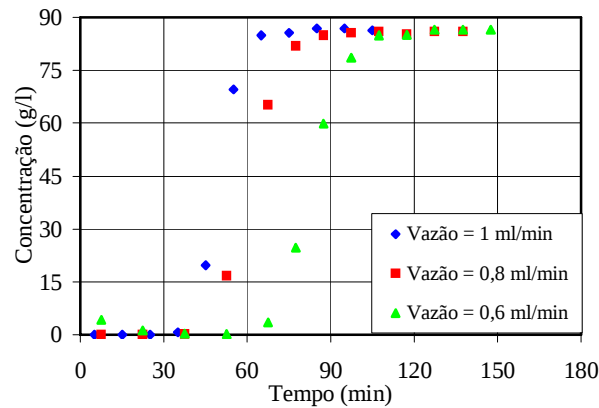


Figura 5. Variação da concentração de formiato de sódio para 3 vazões diferentes

3.2 Ensaios Variando o Tipo de Sal

O ensaio realizado teve como objetivo avaliar o coeficiente de dispersão do arenito para três soluções salinas diferentes: NaCl, BaCl₂ e Na₂SO₄. O corpo de prova utilizado tem diâmetro de 37,25 mm, altura de 100,20 mm e porosidade igual a 28,8 %. As medidas de concentração efluente foram realizadas pelo sensor de fibra óptica, posicionado de acordo com a Figura 6.

Nestes ensaios o CP foi confinado a 1 MPa e as soluções foram injetadas à vazão de 0,5 ml/min. Foram utilizadas concentrações iniciais de 285 g/l de NaCl, 200 g/l de BaCl₂ e 225 g/l de Na₂SO₄. Ao final de cada ensaio, água foi circulada pelo CP a vazão de 0,5 ml/min por aproximadamente 20 horas.

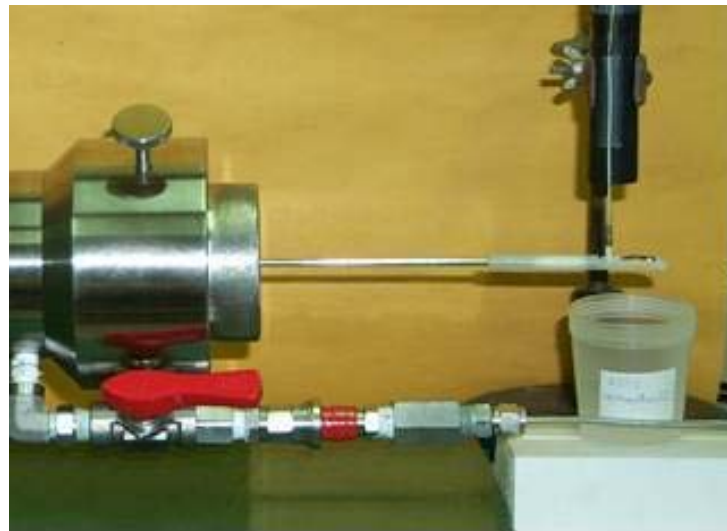


Figura 6. Sensor de fibra óptica

A Figura 7 apresenta a variação das concentrações salinas determinadas pela fibra óptica ao longo do ensaio para cada solução utilizada. Verifica-se que o tempo necessário para a concentração máxima ser verificada no efluente é o mesmo independente do fluido utilizado. Isto já era esperado visto que este tempo depende somente da vazão adotada.

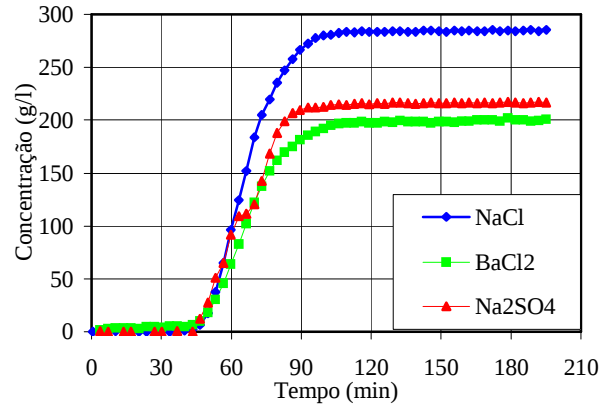


Figura 7. Variação das concentrações para 3 sais diferentes

Este ensaio mostra o potencial da fibra óptica como sensor para realização das medidas de concentração em tempo real e de forma automatizada, sem a necessidade de acompanhamento do ensaio para coleta de efluente.

4. AVALIAÇÃO DO COEFICIENTE DE DISPERSÃO

De posse dos resultados experimentais é realizada então a análise numérica para a determinação dos coeficientes de dispersão hidrodinâmica e dispersividade. Neste caso, a equação de advecção-dispersão que descreve a propagação da concentração (c) de traçador num problema unidimensional, é dada por:

$$\phi \frac{\partial c}{\partial t} + q \frac{\partial c}{\partial x} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (7)$$

onde ϕ é a porosidade, q é a velocidade de Darcy (vazão/área da seção transversal) e D é o coeficiente de dispersão hidrodinâmica longitudinal. Este coeficiente é igual à soma do coeficiente de dispersão mecânica (D_{mec}) e do coeficiente de difusão molecular (D_m) (Bear e Verruijt, 1987), ou seja.

$$D = D_{mec} + D_m \quad (8)$$

O coeficiente de dispersão mecânica é proporcional à velocidade de Darcy:

$$D_{mec} = \alpha_D q \quad (9)$$

Onde: α_D = coeficiente de dispersividade.

Para o arenito utilizado e as vazões impostas, pode-se desprezar a parcela devido à difusão molecular na equação (8). Desta forma, tem-se que:

$$D = D_{mec} \quad (10)$$

Nos testes laboratoriais estudados, primeiramente o meio poroso foi saturado com água e posteriormente injetou-se a solução com o traçador. Portanto, as seguintes condições iniciais para a equação (7) são válidas:

$$t = 0: c = \begin{cases} c_{injetada}, & x \leq 0 \\ 0, & x > 0 \end{cases} \quad (11)$$

onde $c_{injetada}$ é a concentração injetada na face de entrada da amostra ($x = 0$).

A solução analítica para o problema descrito acima é dada por:

$$c(x, t) = \frac{c_{injetada}}{2} \cdot \operatorname{erfc} \left(\frac{x - \frac{q}{\phi} t}{2 \sqrt{\frac{D}{\phi} t}} \right) \quad (12)$$

onde erfc é a função erro complementar.

Após a medida da concentração na face de saída ($x = L$) da amostra em função do tempo t , o coeficiente de dispersão hidrodinâmica D é ajustado utilizando-se o método dos mínimos quadrados. Para isto, foi desenvolvido um programa no ambiente MathCad 2001.

A seguir, nas Figuras 8 e 9, são apresentados os ajustes numéricos aos dados experimentais de concentração obtidos nos ensaios realizados.

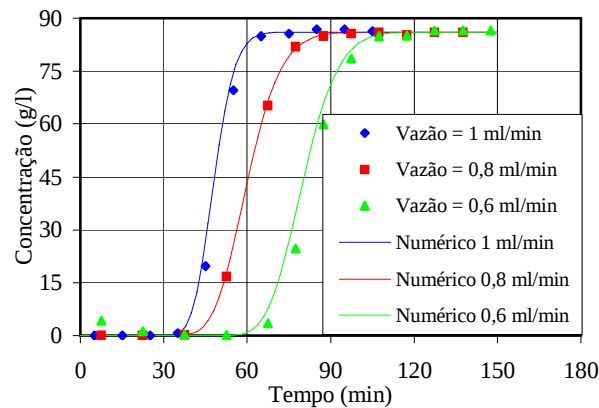


Figura 8. Ajuste numérico aos dados de concentração de formiato de sódio do primeiro ensaio

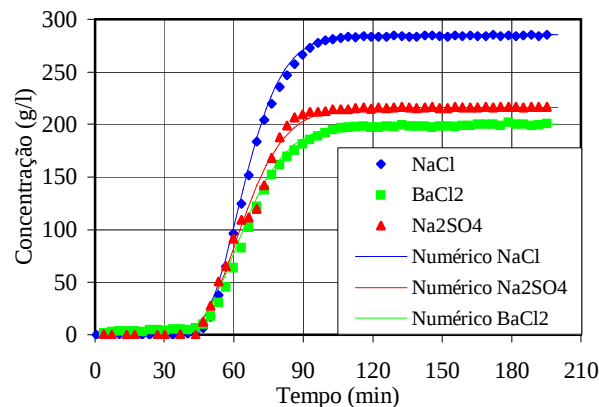


Figura 9. Ajuste numérico aos dados de concentração do segundo ensaio

A Tabela 1 apresenta os valores dos coeficientes de dispersão hidrodinâmica (D) e dispersividade (α_D) obtidos nas análises apresentadas acima. Para cada ensaio os valores obtidos para a dispersividade são muito próximos, independentemente da solução salina utilizada, confirmando o esperado já que a dispersividade é somente função do meio poroso.

Observa-se uma dispersividade média de $1,41$ e $2,40 \times 10^{-3}$ m para o primeiro e segundo corpos de prova, respectivamente. Lopes (2002), em experimentos utilizando arenito Rio Bonito, obteve coeficientes de dispersividade nos corpos de prova 207 e 265, respectivamente, de $1,8$ e $1,1 \times 10^{-2}$ m.

Tabela 1. Parâmetros obtidos na análise numérica

Ensaio	Concentração (g/l)	Vazão (ml/min)	D (m ² /s)	α_D (m)
NaCOOH	86	0,6	1,07 x10 ⁻⁸	1,16 x10 ⁻³
NaCOOH	86	0,8	2,34 x10 ⁻⁸	1,91 x10 ⁻³
NaCOOH	86	1,0	1,79 x10 ⁻⁸	1,17 x10 ⁻³
NaCl	285	0,5	1,58 x10 ⁻⁸	2,07 x10 ⁻³
BaCl ₂	200	0,5	2,03 x10 ⁻⁸	2,66 x10 ⁻³
Na ₂ SO ₄	225	0,5	1,88 x10 ⁻⁸	2,46 x10 ⁻³

5. CONCLUSÃO

Neste trabalho é apresentado um equipamento e uma metodologia de testes para determinação do coeficiente de dispersão de arenitos utilizando o sensor de fibra óptica para o monitoramento da variação de concentração efluente. As principais conclusões são resumidas abaixo:

- A utilização do sensor de fibra óptica apresentou um excelente resultado no monitoramento da concentração em tempo real, sem a necessidade de coleta de efluente.

- Os resultados da concentração efluente foram apresentados e os coeficientes de dispersão e as dispersividades determinadas para a injeção de diferentes traçadores (NaCl, BaCl₂, Na₂SO₄ e NaCOOH).

Ensaios injetando simultaneamente soluções incompatíveis, como o BaCl₂ e Na₂SO₄, determinando-se a constante de reação representam uma próxima etapa na avaliação do processo de precipitação no meio poroso.

6. AGRADECIMENTOS

Os resultados aqui apresentados fazem parte de um projeto financiado com recursos do programa MCT/FINEP/CTPETRO e da PETROBRAS. Os autores gostariam de registrar os seus agradecimentos aos membros integrantes da equipe do Laboratório de Interação Rocha-Fluido do GTEP que de alguma forma contribuíram para realização deste trabalho.

7. REFERÊNCIAS

- SHECAIRA, F.S., BRANCO, C.C.M., SOUZA, A.L., PINTO, A.C., HOLLEBEN, C.R.C., JOHANN, PAULO R.S. **IOR: The Brazilian Perspective**. 2002, SPE 75170.
- STAMPA, C.S. **Solidificação de mistura binária em cavidade anular vertical**. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação do Departamento de Engenharia Mecânica, 1999, PUC-Rio, 198 p.
- MUNIZ, E.S. **Desenvolvimento de equipamento e metodologia de testes para avaliação da interação folhelho-fluido de perfuração**. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Departamento de Engenharia Civil, 2003, PUC-Rio, 175 p.
- BEAR, J. E VERRUIJT, A. **Modeling Groundwater Flow and Pollution**. D. Reidel Publishing Company, Dordrecht / Boston / Lancaster / Tokyo. 1987. (Chapter 6).
- LOPES, R.P.J. **Cinética de precipitação de sulfato de bário em meio poroso: modelagem matemática e laboratorial**. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual do Norte Fluminense, Macaé, Rio de Janeiro, 2002. 89 p.

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste artigo.