



## 2º CONGRESSO BRASILEIRO DE P&D EM PETRÓLEO & GÁS

### ENSAIOS DE DIFUSÃO EM UM NOVO EQUIPAMENTO PARA AVALIAÇÃO DA INTERAÇÃO FOLHELHO-FLUIDO DE PERFURAÇÃO

Eudes Siqueira Muniz<sup>1</sup>, Sérgio A. B. da Fontoura<sup>1</sup> e Rosana F. T. Lomba<sup>2</sup>

<sup>1</sup> PUC-Rio, R. Marquês de São Vicente, 225 – Gávea, Rio de Janeiro, RJ, Brasil; CEP: 22451 900; Tel: (55) 021 3114 1849; 3114 1460; Fax: (55) 021 3114 1459; [eudes@civ.puc-rio.br](mailto:eudes@civ.puc-rio.br) e [fontoura@civ.puc-rio.br](mailto:fontoura@civ.puc-rio.br).

<sup>2</sup> Petrobras/Cenpes, Rio de Janeiro, RJ, [rlomba@cenpes.petrobras.com.br](mailto:rlomba@cenpes.petrobras.com.br)

**Resumo** – O presente trabalho apresenta três ensaios utilizando diferentes metodologias em um novo equipamento capaz de simular as condições de tensões in situ e aplicar gradientes hidráulicos e químicos a corpos de prova de folhelho de forma a avaliar a interação desta rocha com diferentes fluidos de perfuração. A realização de um ensaio neste equipamento permite obter o coeficiente de permeabilidade, o coeficiente de refletividade e o coeficiente de difusão iônica através do folhelho estudado. Estes parâmetros são fundamentais em uma análise de estabilidade que leve em conta as interações físico-químicas entre a rocha e o fluido de perfuração. Os ensaios realizados em folhelhos da bacia submarina brasileira confirmaram o potencial e a versatilidade do equipamento desenvolvido.

Palavras-Chave: Difusão, Folhelho, Estabilidade de poços.

**Abstract** – This paper presents three tests using different methodologies in new equipment designed to apply hydraulic and chemical gradients through shale samples in order to evaluate the shale interaction with a given fluid. The proposed test allows the determination of rock permeability, the coefficient of reflectivity (membrane efficiency) and the ionic diffusion coefficient. These parameters are essential to carry out proper wellbore stability analysis when taking into account the shale-drilling fluid interaction. Tests carried out on Brazilian offshore shale confirmed the good performance and versatility of the equipment.

Keywords: Diffusion, Shale, Wellbore Stability.

## 1. Introdução

A perfuração de poços de petróleo através de folhelhos tem apresentado sérios problemas de instabilidade e grande parte deles é creditado à interação do fluido de perfuração com esta rocha. Em geral, um período de tempo extremamente longo é consumido na resolução destes problemas, tendo como consequência direta, gastos excessivos com a perfuração. Estatísticas fornecidas por Steiger e Leung (1991), indicando gastos de 600 milhões a 1 bilhão de dólares anuais com custos adicionais de perfuração gerados por problemas de instabilidade em poços, continuam atualizadas. Como consequência, a escolha do fluido de perfuração adequado para redução das instabilidades na perfuração de um poço é crucial para minimizar os custos de perfuração em várias partes do mundo. O fluido de perfuração ideal, para fins de estabilidade de poços, deve evitar aumentos indesejados da pressão de poros da rocha o que reduz a resistência da formação.

O controle da variação de pressão de poros pode ser feito utilizando os conceitos de transporte de massa sob condições de gradiente hidráulico e gradiente de concentração química. No caso de meios porosos de baixa permeabilidade como os folhelhos, estes gradientes provocam variações de pressão no fluido dos poros por efeitos de difusão hidráulica e iônica e por efeitos osmóticos, os quais podem variar com o potencial da rocha em impedir o fluxo de íons através da formação.

De forma a avaliar a interação entre folhelhos e fluidos de perfuração foi desenvolvido um novo equipamento capaz de simular as condições de tensões *in situ* e aplicar gradientes hidráulicos e químicos ao corpo de prova estudado. Este equipamento permite obter experimentalmente os parâmetros relevantes à descrição dos mecanismos de interação fluido-folhelho, em particular ao transporte de água e íons devido a gradientes hidráulicos e químicos, cujos resultados possam ser diretamente aplicados ao controle de instabilidades durante a perfuração.

Apesar da importância do tema, poucos estudos experimentais têm sido realizados onde o processo de variação das pressões de poros em folhelhos são observadas em função das variações das condições de contorno. Ao contrário dos equipamentos apresentados na literatura (Van Oort, 1994; Simpson e Dearing, 2000; Tan e Richards, 1996), o equipamento desenvolvido é muito versátil permitindo realizar etapas preliminares de saturação e adensamento do corpo de prova restabelecendo adequadamente as condições *in situ*. Em paralelo ao desenvolvimento deste equipamento, um simulador computacional (Frydman e Fontoura, 1999) para a interpretação dos resultados foi desenvolvido, em particular para a obtenção dos coeficientes de permeabilidade, de refletividade e de difusão iônica. Ensaio realizados com membrana osmótica em corpos de prova preparados especialmente a partir de papel celofane (Muniz et al., 2002a) e em folhelhos (Muniz et al., 2002b) utilizando diferentes tipos e concentrações de sais confirmaram o potencial do equipamento desenvolvido. Detalhes do equipamento e sensores podem ser encontrados em Muniz (2003). Serão apresentados neste trabalho três ensaios e os resultados obtidos utilizando-se metodologias diferentes para cada um.

## 2. Equipamentos Utilizados nos Ensaio de Difusão

O equipamento foi construído em aço carbono 4140 de alta resistência e projetado para suportar pressões confinantes de até 30 MPa. A base da célula foi niquelada para evitar corrosão quando em contato com soluções salinas. Devido ao seu tamanho o mesmo procedimento não foi possível de ser realizado com a tampa do vaso de pressão, sendo esta zincada. A Figura 1 apresenta o desenho da célula de difusão. O corpo de prova cilíndrico é colocado entre dois “caps” e envolvido por membrana termorretrátil. O projeto prevê a utilização de corpos de prova de 1,5” (38,1 mm) ou 2” (50,8 mm) de diâmetro e uma altura máxima de 3 cm. A célula de carga usada para medir a força axial aplicada se apoia sobre o “cap” superior e todo o conjunto é submetido à pressão confinante.

Dois canais que atravessam a base do equipamento até o reservatório inferior são destinados à medição de poropressão e concentração salina. A pressão confinante é também aplicada por um canal que atravessa a base da célula até o interior do vaso de pressão. Todos os cálculos utilizados no dimensionamento do equipamento e desenhos detalhados são apresentados por Muniz et al. (1999) e Carvalho et al. (1999). As pressões confinante, axial e contrapressão são aplicadas por equipamentos tipo GDS. Este equipamento permite a aplicação e a manutenção de uma pressão constante ao longo do ensaio. Atualmente dispõe-se de dois GDS de 2 MPa e um de 32 MPa.

A circulação de fluido no sistema é feita por intermédio de uma bomba da marca WATERS de vazão constante como pode ser visto na Figura 1. Esta bomba imprime vazões que variam de 0,001 a 10 ml/min, e suporta pressões de até 42 MPa (6000 psi). A pressão na linha de circulação é mantida através do uso de uma válvula de alívio cuja faixa de trabalho pode ser alterada em função da troca de uma mola interna.

As pressões atuantes no corpo de prova são medidas por transdutores com capacidade de 21 MPa (3000 psi). A disposição das linhas de circulação de fluido, dos equipamentos e instrumentação estão apresentados na Figura 1. A interface utilizada trabalha a altas pressões e não reage com os fluidos utilizados, neste caso, soluções salinas, óleos minerais e água. Uma foto da interface também é apresentada na Figura 1. O monitoramento do ensaio é realizado utilizando o sistema de aquisição de dados AqDados para Windows, 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.

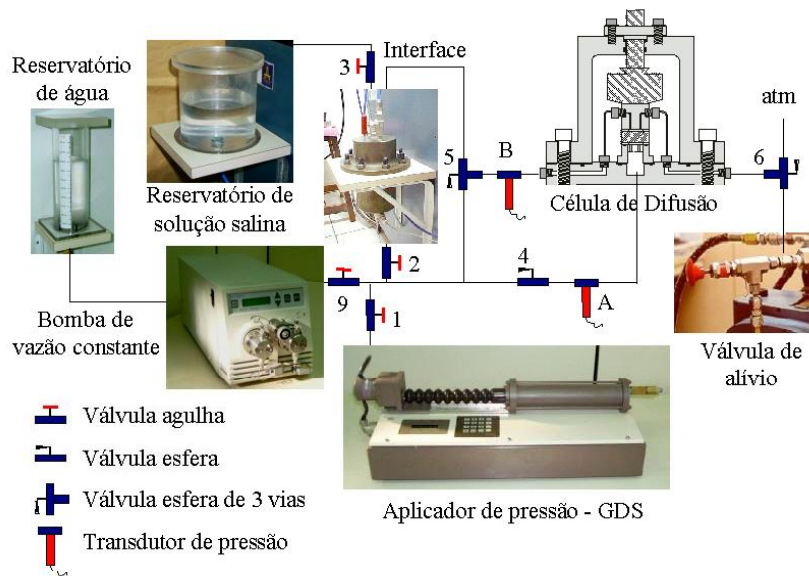


Figura 1. Desenho esquemático com o circuito de poropressão

### 3. Metodologia Proposta para os Ensaios de Difusão

O ensaio de difusão é constituído de fases distintas representadas pela saturação, adensamento, difusão de pressão e difusão de íons. A maioria das técnicas associadas a estas etapas foram desenvolvidas originalmente para realização de ensaios em solos e serão aqui utilizadas como parte da metodologia proposta.

#### 3.1. Etapa de Saturação do Corpo de Prova

A saturação consiste em se preencher todos os vazios do corpo de prova por fluido, removendo-se o ar que ainda se encontra dentro deste ou na linha de poropressão. O tempo necessário para a saturação depende do tipo de material, do tamanho do corpo de prova, assim como do grau inicial de saturação. O método de saturação por aplicação de contrapressão é adotado no presente trabalho.

O parâmetro  $B$ , (Skempton, 1954), é utilizado nesta etapa do ensaio para verificação do grau de saturação do corpo de prova. A sua determinação consiste do aumento da pressão de confinamento sob condições não drenadas com o monitoramento do acréscimo de poropressão. A Equação 1 proposta por Bishop e Henkel (1962), representa a solicitação imposta e pode ser utilizada para determinação do parâmetro  $B$ .

$$B = \frac{\Delta u}{\Delta \sigma_{conf}} \quad (1)$$

onde,

$\Delta u$  = variação de poropressão sob condições não drenadas;

$\Delta \sigma_{conf}$  = variação de tensão confinante da célula de difusão.

#### 3.2. Etapa de Consolidação do Corpo de Prova

Neste estágio, o corpo de prova é consolidado para as condições de pressão em que se deseja realizar o ensaio. A válvula de drenagem pode ser aberta para a atmosfera ou para um sistema de contrapressão, e desta forma, a poropressão se reduz a zero ou até o valor da contrapressão aplicada. A drenagem implica em redução de volume e aumento de tensão efetiva que depois da consolidação é igual a diferença entre a pressão confinante e a contrapressão. O processo de consolidação deve se prolongar até que 95% do excesso de poropressão seja dissipado ou não se verifique mais deformações no corpo de prova. Esta etapa é normalmente realizada em 24 horas.

#### 3.3. Etapa de Difusão de pressão do Corpo de Prova

Terminada a etapa de consolidação, ou seja, quando as poropressões e deformações do corpo de prova se estabilizam, dá-se início ao ensaio de difusão de pressão. Esta etapa consiste em aumentar a poropressão no reservatório superior (topo do corpo de prova) e monitorar o seu crescimento no reservatório inferior (base do corpo de prova). Esta etapa tem como objetivo estimar o coeficiente de difusão de pressão do corpo de prova. A análise dos resultados para obtenção do coeficiente de difusão de poropressão é realizada utilizando o programa FPORO. Para execução da análise são necessários os valores do Módulo de elasticidade ( $E$ ) e do coeficiente de Poisson ( $\nu$ ) do material em questão.

### 3.4. Etapa de Difusão de Íons do Corpo de Prova

Esta fase inicia-se após a estabilização da poropressão ao longo do corpo de prova, ou seja, quando a poropressão na base se iguala à pressão no topo do corpo de prova. Neste instante, mantém-se as pressões nos reservatórios e substitui o fluido do reservatório superior pelo fluido de interesse para o ensaio. A introdução de um gradiente químico mantendo-se o gradiente hidráulico constante acarretará no surgimento de um fluxo osmótico que tenderá a transportar água do reservatório inferior (baixa concentração) para a superior (alta concentração) fazendo com que a pressão no reservatório inferior diminua. Esta variação de pressão é monitorada por transdutores de pressão. Em função do gradiente químico o fenômeno de difusão de íons também estará presente no transporte dos íons do reservatório superior para o inferior, fazendo com que a concentração no reservatório inferior aumente ao longo do ensaio, sendo esta variação monitorada pelo sensor de fibra óptica (Caetano, 2001).

## 4. Ensaio na Célula de Difusão

Três ensaios utilizando diferentes metodologias foram realizados em um folhelho proveniente da plataforma submarina brasileira. Nestes ensaios utilizou-se como fluido de percolação uma solução a 35 % em peso de  $\text{CaCl}_2$  nos CPs 31 e 35 e óleo mineral no CP38. Estes corpos de prova foram levados à câmara de difusão, saturados e adensados a uma pressão confinante de 3000 kPa e contrapressão de 400 kPa. O ensaio no CP31 utilizou-se da metodologia apresentada no item 3. O ensaio no CP35 foi realizado utilizando-se a mesma metodologia de saturação e adensamento adotada para o CP31, entretanto, a solução salina foi aplicada desde o início da fase de difusão de pressão de forma a simular a condição de campo em que o fluido de perfuração entra em contato com o folhelho imediatamente após a passagem da broca. Para realização do ensaio no CP38 fez-se a saturação com aplicação de contrapressão somente pela base do corpo de prova. Esta metodologia foi adotada visto a ineficiente troca da água por óleo mineral no topo do corpo de prova observada num outro ensaio quando se utilizou a metodologia do item 3. Desta forma, garantiu-se que no início da fase de difusão de pressão somente óleo mineral estava presente no topo do corpo de prova.

A Figura 2 apresenta a variação das pressões desde o início da fase de difusão de pressão para o CP31. A fase de difusão de íons inicia-se após a estabilização das poropressões nos reservatórios inferior e superior, que neste caso ocorreu com aproximadamente 24 horas de ensaio. Neste ponto, mantém-se as pressões nos reservatórios e substitui-se o fluido de circulação (água desmineralizada) no reservatório superior pela solução de  $\text{CaCl}_2$ . A introdução de um gradiente químico acarreta no surgimento de um fluxo osmótico que faz com que a pressão no reservatório inferior diminua. Esta variação de pressão é monitorada por transdutores de pressão e no caso deste ensaio houve uma diferença de aproximadamente 1010 kPa.

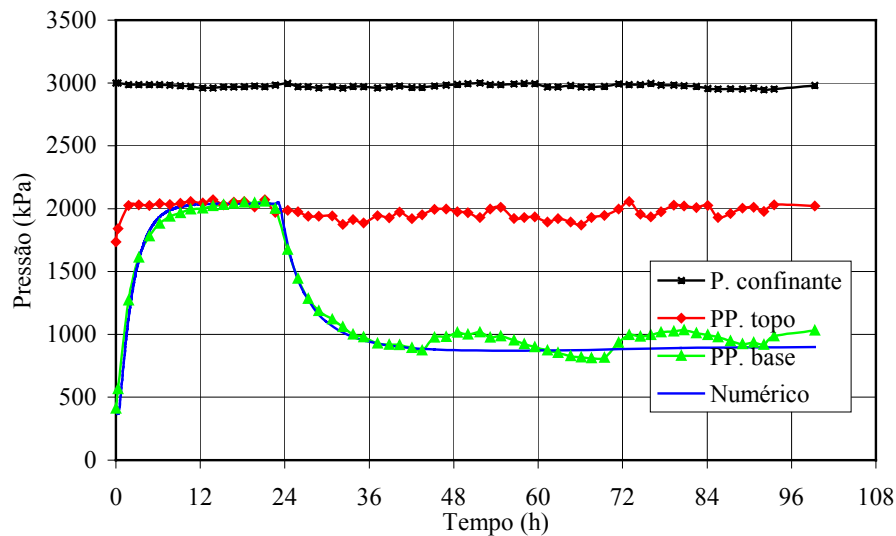


Figura 2. Fase de difusão de pressão e íons do CP31

A Figura 3 apresenta a variação das pressões para o CP35 onde circulou-se solução salina a 35 % de  $\text{CaCl}_2$  desde o início da fase de difusão de pressão. Observa-se nesta figura que o crescimento da pressão no reservatório inferior ocorre de forma mais lenta que no ensaio anterior e que as pressões de topo e base não se estabilizam em um mesmo nível de pressão. Isto ocorre porque o efeito da difusão de pressão e o efeito osmótico atuam simultaneamente mas em sentidos contrários. Somente após 48 horas de ensaio atingiu-se a estabilização com uma diferença entre a poropressão de topo e base de aproximadamente 1045 kPa. Em trabalho anterior, Muniz et al. (2002b) apresentaram resultados que comprovam que quanto maior a concentração de  $\text{CaCl}_2$  maior é a pressão osmótica gerada. Como nos

ensaios dos corpos de prova 31 e 35 foram utilizadas a mesma concentração de  $\text{CaCl}_2$  obtêve-se pressões osmóticas muito similares apesar de se ter utilizado metodologias diferentes na realização dos ensaios.

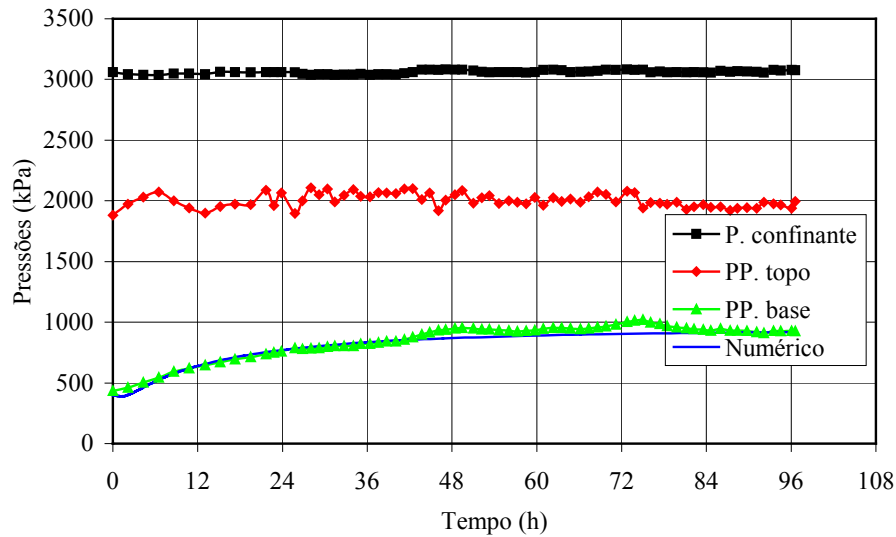


Figura 3. Fase de difusão de pressão e íons do CP35

As Figuras 2 e 3 também apresentam a curva do ajuste numérico aos dados experimentais realizada utilizando o programa FPORO. Este programa é baseado no método dos elementos finitos e foi desenvolvido pelo GTEP para retroanalisar e obter os parâmetros do ensaio de difusão. A Tabela 1 apresenta os parâmetros obtidos pela análise numérica. Observa-se valores muito próximos nos parâmetros analisados numericamente sugerindo que qualquer que seja a metodologia utilizada para realização do ensaio, o programa FPORO é capaz de avaliar os dados e obter parâmetros confiáveis.

Tabela 1. Valores dos parâmetros de difusão e permeabilidade obtidos

CP	Permeabilidade ( $\text{m}^2$ )	Coef. de reflexão	Coef. de Difusão ( $\text{m}^2/\text{s}$ )	Pressão Osmótica (kPa)
CP31	$6,0 * 10^{-20}$	0,0180	$5,36 * 10^{-11}$	1010
CP35	$1,5 * 10^{-20}$	0,0165	$1,21 * 10^{-11}$	1045

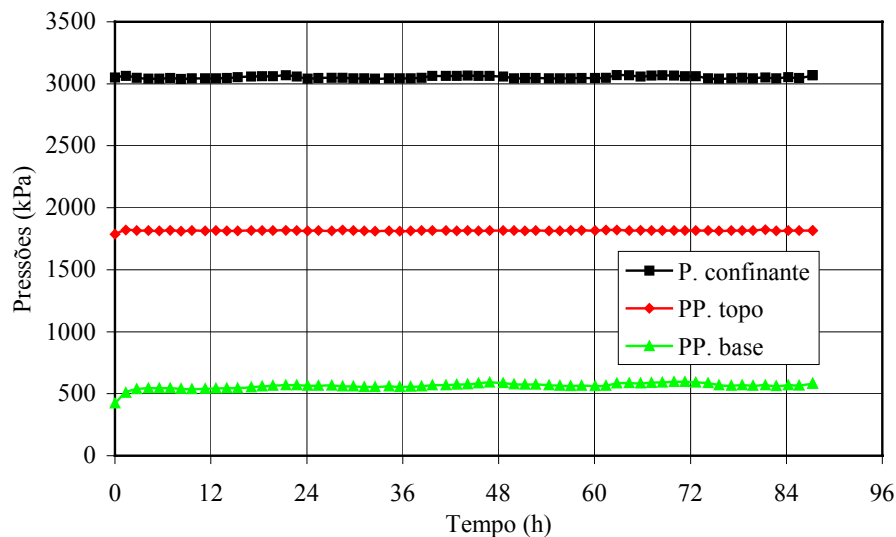


Figura 4. Fase de difusão de pressão do CP38

A Figura 4 mostra o ensaio realizado no CP38 cujo objetivo foi avaliar o efeito capilar do óleo mineral na transmissão de pressão. Após as etapas de saturação e adensamento aplicou-se um gradiente hidráulico ao corpo de prova, sendo óleo mineral o fluido presente no reservatório superior (topo). Observa-se o comportamento inicialmente esperado, ou seja, o óleo mineral devido à sua alta pressão capilar não invade o folhelho impedindo que a pressão seja transmitida para o reservatório inferior.

## 5. Conclusões

O equipamento desenvolvido apresentou bom desempenho e versatilidade com a possibilidade de adaptar diferentes metodologias para realização dos ensaios. Apesar dos poucos ensaios realizados até o momento fica claro o seu potencial no estudo da interação folhelho-fluido de perfuração.

Com relação aos resultados obtidos foi observado comportamentos já discutidos em trabalhos anteriores e os valores obtidos para a tortuosidade, coeficiente de refletividade e o coeficiente de difusão efetivo encontram-se dentro de uma faixa de valores normalmente apresentados na literatura.

A realização do ensaio com óleo mineral foi muito importante visto que daqui em diante ensaios em diferentes fluidos base óleo poderão ser realizados, avaliando os efeitos de interação rocha-fluido na estabilidade de poços.

## 6. Agradecimentos

Os resultados aqui apresentados fazem parte de um projeto financiado com recursos do programa MCT/FINEP/CTPETRO e da PETROBRAS. Os autores agradecem o apoio financeiro destas entidades. Além disto agradecimentos são extensivos à Agência Nacional do Petróleo, ANP, através do programa de recursos humanos, pela concessão de bolsa de estudos ao primeiro autor durante o desenvolvimento deste trabalho e aos membros do Laboratório de Interação Rocha-Fluido do GTEP/PUC-Rio que em muito contribuíram para realização deste projeto.

## 7. Referências

- BISHOP, A. W., HENKEL, D. J. *The measurement of soil properties in the triaxial test*, Ed. Arnold Ltda, London, 227 p, 1962.
- CAETANO, L.A.C, Estudo experimental do processo de difusão em folhelhos usando fibra óptica, *Dissertação de mestrado*, Departamento de Engenharia Civil, PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2001.
- CARVALHO, F.C.S., MUNIZ, E.S., FONTOURA, S.A.B., Diffusion tests: Part II – Shale Tests, Report GTEP 019B/99, submitted to the *Joint Industry Project Steering Committee*, December, 13 p, 1999.
- FRYDMAN, M., FONTOURA, S.A.B., Algorithms for wellbore stability simulation in shales – numerical formulation, Relatório GTEP-24/1999, Relatório Final submetido ao Consórcio de Empresas *Drilling Through Shales*, 49 p, 1999.
- MUNIZ, E. S., Desenvolvimento de Equipamento e Metodologia de Teste e Análise para Avaliação da Interação Folhelho-Fluido de Perfuração, *Tese de Doutorado* em andamento, Departamento de Engenharia Civil, PUC-Rio, Rio de Janeiro, previsão Abril de 2003.
- MUNIZ, E.S., CARVALHO, F.C.S., FONTOURA, S.A.B., Diffusion tests, Report GTEP 019/99, submitted to the *Joint Industry Project Steering Committee*, September, 1999, 34 p.
- MUNIZ, E.S., RABE, C., CAETANO, L.A., MALTA, M.S., FONTOURA, S.A.B., Desenvolvimento de metodologia de testes para avaliação da interação folhelho-fluido de perfuração, Relatório Final submetido à *FINEP* (Financiadora de Estudos e Projetos) e ao *CENPES/PETROBRAS*, Contrato 65.999.0454.00, programa CTPETRO, 47 p. 2002a.
- MUNIZ, E.S., FONTOURA, S.A.B., LOMBA, R.F.T., Novo Equipamento para Avaliação da Interação Folhelho-Fluido de Perfuração, *XII COBRAMSEG*; Anais do III Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas; 20 a 24 de Outubro, São Paulo, P. 55 – 65, 2002b.
- SIMPSON, J.P., DEARING, H.L., Diffusion osmosis-an unrecognized cause of shale instability, paper SPE 59190 apresentado no *IADC/SPE Drilling Conference, New Orleans*, 23 a 25 de Fevereiro, 2000.
- SKEMPTON, A. W., The pore-pressure coefficients A and B, *Geotéchnique*, 4, p. 143-147, 1954.
- STEIGER, R. P., LEUNG, P. K., Consolidated undrained triaxial test procedure for shales, *Rock Mechanics as a Multidisciplinary Science*, Proc. 32nd U. S. Symp., J. C. Roegiers Ed, p. 637-646, 1991.
- TAN, P.C., RICHARDS, G.B., Managing physico-chemical wellbore instability in shales with the chemical potential mechanism paper SPE 36971 apresentado na *Asia Pacific Oil and Gas Conference*, Adelaide, 28 de Outubro, 1996.
- VAN OORT, E.; A novel technique for the investigation of drilling fluid induced borehole instability in shales, *Proc. EUROCK'94*, p. 293-308, 1994.