

Copyright 2004, Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás - IBP

Este Trabalho Técnico Científico foi preparado para apresentação no 3º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás, a ser realizado no período de 2 a 5 de outubro de 2005, em Salvador. Este Trabalho Técnico Científico foi selecionado e/ou revisado pela Comissão Científica, para apresentação no Evento. O conteúdo do Trabalho, como apresentado, não foi revisado pelo IBP. Os organizadores não irão traduzir ou corrigir os textos recebidos. O material conforme, apresentado, não necessariamente reflete as opiniões do Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás, Sócios e Representantes. É de conhecimento e aprovação do(s) autor(es) que este Trabalho será publicado nos Anais do 3º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás

ESTUDO DAS INTERAÇÕES QUÍMICA E MECÂNICA ENTRE ROCHA – FLUIDO DE PERFURAÇÃO QUE CONTRIBUEM PARA A INSTABILIDADE DOS POÇOS DE PETRÓLEO

Cleysson Castro Corrêa¹, Regina Sandra Veiga Nascimento² Carlos Henrique Marques de Sá³

¹ Instituto de Química – Departamento de Química Orgânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, CT Bloco A – 6º andar – Cidade Universitária – CEP:21941-590, Rio de Janeiro, RJ, cleysson@iq.ufrj.br

² Instituto de Química – Departamento de Química Orgânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, CT Bloco A – 6º andar – Cidade Universitária – CEP:21941-590, Rio de Janeiro, RJ, rsandra@iq.ufrj.br

³ Cenpes – Tecnologia de Engenharia de Poço – Cidade Universitária – Quadra 7 - CEP:21949-900, Rio de Janeiro, RJ, chsa@petrobras.com.br

Resumo

Neste trabalho desenvolveu-se um novo ensaio mecânico submerso de flexão em três pontos, para avaliação, simultânea, dos processos de natureza mecânica e química, envolvidos nas interações rocha – fluido de perfuração que contribuem para a instabilidade dos poços de petróleo. Os fluidos utilizados foram ar, óleo mineral, água destilada, soluções aquosas poliméricas dos inibidores: poliacrilamida não hidrolisada, poli(cloreto de dialildimetil-amônio), com diferentes pesos moleculares, e seu copolímero com poliacrilamida. Utilizou-se o ensaio de rolamento para avaliar os mecanismos envolvidos na inibição do folhelho. Os resultados sugerem que as interações polímero – folhelho sejam responsáveis pela resistência mecânica do folhelho, pois a quantidade de água total e o teor de carbono total adsorvidos pelo folhelho foram as mesmas, independente do inibidor utilizado. Os resultados também sugerem que a instabilidade do folhelho depende da quantidade de água adsorvida, já que independente do tipo de inibidor utilizado, a quantidade de água adsorvida foi igual à quantidade obtida para o sistema folhelho – água.

Palavras-Chave: novo ensaio mecânico submerso de flexão em três pontos; interações rocha – fluido de perfuração; instabilidade dos poços de petróleo

Abstract

In this work it was developed a new three points flexural mechanical test submersed for the simultaneous evaluation of the mechanical and chemical nature processes involved in the rock-drilling fluid interactions, which contribute for the borehole instability. The utilized fluids were air, mineral oil, distilled water and water solutions of non hydrolised polyacrylamide, poly(diallyldimethylammonium chloride) with different molecular weights, and the copolymer with acrylamide. Cuttings rolling tests were utilized to help in the understanding of the mechanisms involved in the shale's inhibition process. The results suggest that shale/polymer interactions are responsible for the shale's mechanical resistance, since the quantity of water and total carbon content of the shales were the same, after the test, independently of the inhibitor used. The results also suggest that the shale instability depends on the amount of adsorbed water, since independently of the inhibitor utilized, the quantity of adsorbed water was the same as that obtained with the shale/water system.

Keywords: new three points flexural mechanical test submersed, rock-drilling fluid interactions, borehole instability

1. Introdução

Durante a perfuração de poços petrolíferos é de fundamental importância a preservação da estabilidade das paredes dos mesmos. Aproximadamente 75% das formações perfuradas são constituídas de folhelhos, aos quais associam-se 90% dos problemas relacionados à instabilidade de poços. Alguns tipos de folhelhos são muito reativos quando em contato com a água, devido à presença do argilomineral, esmectita, e a perfuração através deles pode apresentar vários problemas, podendo-se chegar ao total colapso do poço (Mody e Hale, 1993). Diversos aditivos químicos inibidores, geralmente polímeros, podem ser usados no fluido de perfuração para evitar a degradação das paredes dos poços perfurados e para minimizar a dispersão dos cascalhos gerados durante a sua remoção para a superfície. Vários tipos de polímeros têm sido usados como inibidores de folhelhos reativos: aniônicos, catiônicos, não iônicos e anfóteros. A capacidade de estabilização destes polímeros depende de diversos fatores, embora os mecanismos através dos quais atuam não estejam ainda bem elucidados (Darley e Gray, 1988). A estabilidade dos poços de petróleo tem sido estudada por longo tempo, utilizando principalmente, duas óticas bastante distintas. Uma delas considera o problema exclusivamente sob o aspecto da mecânica de rochas (Handim, 1989) e o outro, sob o aspecto químico ou de interação fluido – folhelho (Chenevert e Osisanya, 1989), não levando em consideração as possíveis interações entre os dois processos.

No presente estudo foi desenvolvido um novo ensaio mecânico de flexão em três pontos submerso, em diferentes meios, para a avaliação, simultânea, dos processos de natureza mecânica e química, envolvidos nas interações rocha – fluido de perfuração que contribuem para a instabilidade dos poços de petróleo. Os ensaios de rolamento e de deformação linear, usados na indústria de petróleo, foram utilizados para ajudar na compreensão dos mecanismos que promovem a instabilidade do folhelho.

2. Materiais e Métodos

2.1. Amostra do Folhelho

Neste estudo foram usadas amostras de folhelho obtido a partir de um afloramento natural em Calumbí (SE) – Brasil. O folhelho foi nomeado folhelho – verde e tem uma fração total de argilominerais igual a 45 % {23 % illita / esmectita (% illita = 0 – 9 %), 16 % illita, 4 % clorita e 2 % caulinita}, determinado pela difração de raios – X.

2.2. Ensaio de Rolamento

O ensaio de rolamento é o principal ensaio usado pela indústria de petróleo para avaliar a capacidade de um aditivo ou de um fluido formulado de inibir a reatividade dos folhelhos, isto é, de evitar a desintegração dos cascalhos. Neste estudo foram realizados ensaios de rolamento do folhelho – verde com a família de homopolímeros catiônicos: poli(cloreto de dialildimetilamônio) de alto, médio e baixo peso molecular (PDADMAC – HMw, MMw e LMw), o copolímero catiônico contendo 13 % de grupos catiônicos: poli(cloreto de dialildimetilamônio – co – acrilamida) (PDADMAC – co – AM) e o homopolímero poli(acrilamida) (PAM) próximo a neutralidade (< 2 % de grupos acrilato). Todos os polímeros são provenientes da Sigma-Aldrich Company (EUA).

Em células Baroid contendo 50 g do folhelho – verde peneirado em malha 4 – 8 (abertura 23,62 - 4,76 mm), adicionaram-se 350 mL de soluções poliméricas PDADMAC (HMw, MMw, LMw), PDADMAC – co – AM e PAM nas seguintes concentrações: 0,2; 0,5; 0,8 e 1,0% (p/v). As células foram introduzidas no forno-rotatório e roladas a 150°F (66°C) por 16 horas. O conteúdo das células foi vertido sobre peneira de malha 30 (abertura 0,12mm). O folhelho foi então lavado com água e seco em estufa a 100°C por 16 horas. O material seco foi pesado (material disperso) e, em seguida, peneirado em malha 8, sendo pesado novamente (material intacto). O ensaio em branco foi feito rolando-se apenas folhelho e água destilada, à 150°F (66°C) por 16 horas, sem adição de polímeros e sendo igualmente seco, peneirado e pesado, conforme descrito acima para as soluções poliméricas. A porcentagem do folhelho – verde recuperado foi calculada dividindo-se o valor de massa recuperada pelo valor inicial do folhelho.

2.3. Novo Ensaio Mecânico Submerso de Flexão em Três Pontos

No presente estudo foi desenvolvido um novo ensaio mecânico de flexão em três pontos, visando avaliar simultaneamente, os processos de natureza química e mecânica envolvidos e as possíveis interações entre eles. A Figura 1 mostra com mais detalhes os acessórios que foram projetados e construídos para serem utilizados no novo ensaio: acoplamento, cutelo de aplicação de carga, o extensômetro e a cubeta, onde é inserido o fluido e o corpo de prova do folhelho a serem estudados.

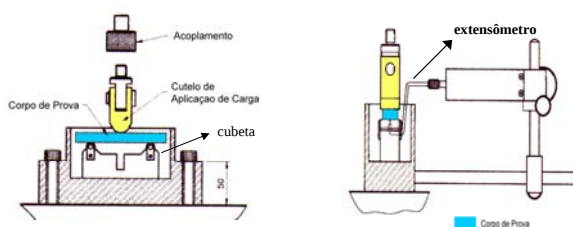


Figura 1. Acessórios utilizados no novo ensaio mecânico submerso de flexão em três pontos

Esses acessórios foram acoplados ao aparelho de Ensaio Mecânico Universal, modelo DL –10000 EMIC, e ao computador que utiliza o Programa Tesc, desenvolvido pela EMIC, que permite medir as propriedades mecânicas como a Tensão Máxima (MPa), a Força Máxima (N), a Deformação (mm) e o Módulo Elástico (MPa).

Os corpos de prova do folhelho foram confeccionados a partir do folhelho – verde com uma secção reta inicial média de 199 mm², submersos em ar (sem fluido), óleo mineral, água destilada, soluções poliméricas 1,0 % (p/v) de PAM, PDADMAC-co-AM e PDADMAC – MMw, e submetidos ao novo ensaio mecânico submerso de flexão em três pontos com uma velocidade de ensaio de 0,05 mm / min. O tempo médio (min) de duração do ensaio para cada sistema fluido – folhelho estudado foi medido através de um cronômetro.

O comportamento químico dos corpos de prova do folhelho foi estudado através da análise termogravimétrica (Santos, 1997), medindo-se a quantidade de água adsorvida (entre 30 – 150 °C) na superfície do folhelho, após serem submersos em diferentes fluidos, submetidos ao novo ensaio e em seguida, secos ao ar durante 24 horas a temperatura ambiente. As amostras foram obtidas a partir das superfícies superior e inferior ao ponto de aplicação da carga, como mostra a Figura 2. As curvas termogravimétricas foram obtidas através do instrumento Shimadzu TGA – 51, sob atmosfera de nitrogênio com uma taxa de aquecimento de 10 °C / min.

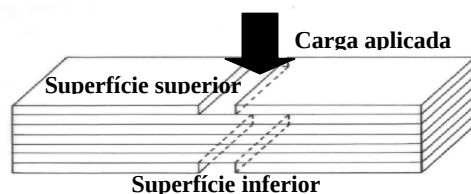


Figura 2. Representação esquemática da obtenção da amostra do folhelho para a análise termogravimétrica

O comportamento químico também foi estudado através da análise de carbono total, determinando o teor de polímero adsorvido nos sistemas polímero – folhelho. As análises foram realizadas a partir das amostras das superfícies superior e inferior, conforme discutido anteriormente e apresentado na Figura 2. Os teores de carbono foram determinados pelo analisador elementar da marca Flash EA modelo 1112. O gás de queima foi oxigênio e o gás de arraste, hélio, com uma vazão de 130mL/min. A detecção foi feita por condutividade térmica no limite de 0,01%.

3. Resultados e Discussão

3.1. Ensaio de Rolamento

Os resultados dos ensaios de rolamento com o folhelho usando as três classes de homopolímeros catiônicos (PDADMAC-LMw, PDADMAC-MMw e PDADMAC-HMw), o copolímero catiônico (PDADMAC-co-AM) e o neutro (PAM) estão representados nas curvas da Figura 3.

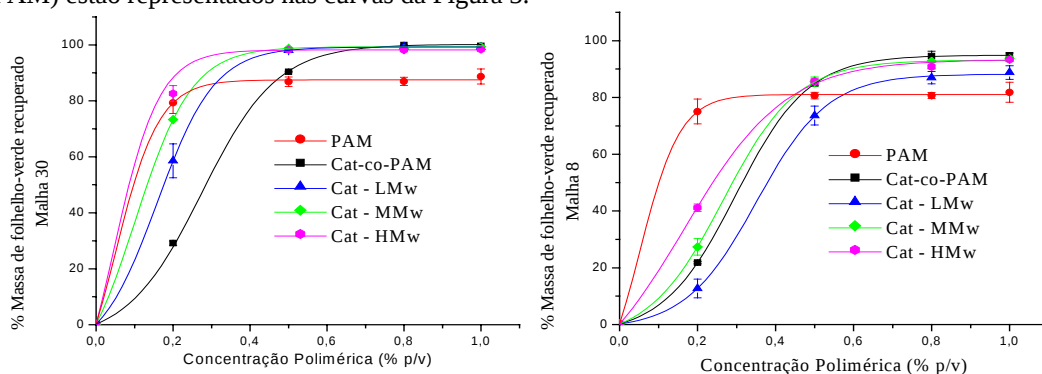


Figura 3. Ensaio de Rolamento com o Folhelho – Verde nas Malhas 30 e 8, respectivamente

Os resultados dos ensaios, mostrados na Figura 3, possibilitaram visualizar as diferenças na porcentagem de massa de folhelho recuperado em função da concentração polimérica, devido à alta reatividade do folhelho (0% de massa de folhelho recuperado nos ensaios em branco). Segundo as curvas dos ensaios de rolamento dos homopolímeros catiônicos e do copolímero observou-se que a porcentagem de massa de folhelho recuperado aumenta exponencialmente com o acréscimo na concentração polimérica, tendendo a um patamar, tanto em relação ao material disperso (Malha 30), quanto ao material intacto (Malha 8). Já as curvas dos ensaios de rolamento com o polímero neutro poliácridamida mostram que o platô é alcançado a concentrações muito menores. Isto sugere que pelo menos dois mecanismos estejam envolvidos na inibição. Para a poliácridamida o mecanismo sugerido é o de encapsulamento dos cascalhos, através da formação de ligações de hidrogênio entre os grupos carbonila do polímero e os grupos aluminol $\{AlO_2(OH)\}$ nas faces laterais do folhelho (Darley e Gray, 1988; Lee et al., 1991). Para os homopolímeros catiônicos e o copolímero (grau médio de cationicidade em torno de 13 %), o mecanismo sugerido é baseado na troca iônica e na forte interação dos grupos funcionais de carga positiva do polímero com os sítios negativos das faces maiores do folhelho (Schmidt et al., 1992).

Já na curva do ensaio de rolamento do copolímero, em relação ao material intacto (Malha 8), pode-se observar para maiores concentrações (0,8 e 1,0 % p/v) que ocorreu uma maior porcentagem de recuperação do folhelho, frente aos demais homopolímeros catiônicos, apesar da sua baixa cationicidade. Isso se deve, provavelmente, a um terceiro mecanismo, onde ocorre a ação conjunta dos grupos catiônicos da macromolécula e dos grupos não iônicos da acrilamida, que encapsulam as superfícies laterais do folhelho. A maior porcentagem de massa de folhelho recuperado, para todos os polímeros estudados, foi obtida com uma concentração de 1,0 % p/v, sendo a utilizada no novo ensaio mecânico.

3.2. Novo Ensaio Mecânico Submerso de Flexão em Três Pontos

As propriedades mecânicas do folhelho, como Tensão Máxima (MPa), Força Máxima (N), Deformação (mm) e Módulo Elástico (MPa) foram obtidas a partir do novo ensaio mecânico em diferentes fluidos estudados são mostrados nas Figuras 4, 5 e 6.

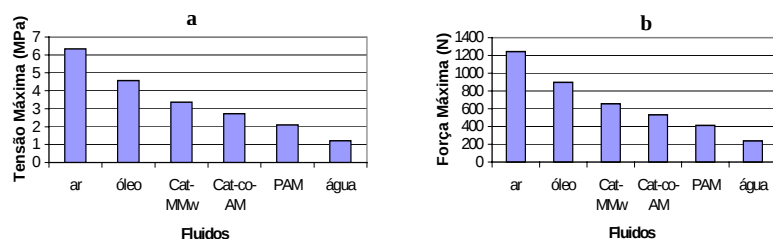


Figura 4. Comparação das propriedades mecânicas: (a) Tensão Máxima (MPa) e (b) Força Máxima (N) dos corpos de prova do folhelho submersos em diferentes fluidos obtidas a partir do novo ensaio mecânico

Pode-se observar nas Figuras 4 (a) e (b) que os corpos de prova submersos em ar (sem fluido) apresentaram uma maior resistência mecânica (Tensão Máxima 6,3 MPa e Força Máxima 1242 N) do que aqueles submersos tanto em óleo quanto em fluidos aquosos. No folhelho exposto ao ar, a ruptura irá ocorrer quando a energia interna da rocha atingir níveis intoleráveis, ou seja, superiores ao limite crítico do material, determinado pela quantidade de água presente no folhelho em seu estado natural e pelo grau de interação existente entre as suas camadas (Grim, 1965). Já os corpos de prova submersos em óleo apresentaram uma maior resistência mecânica (Tensão Máxima 4,6 MPa e Força Máxima 900 N) do que aqueles submersos em fluidos aquosos, provavelmente, devido à menor interação óleo – folhelho. A interação óleo – folhelho gera um estado menos estável que o observado no folhelho em seu estado natural (sem fluido), já que mostraram gerar corpos de prova menos resistentes à flexão.

Os corpos de prova submersos em água destilada apresentaram uma menor resistência mecânica (Tensão Máxima 1,2 MPa e Força Máxima 238 N), provavelmente, devido à maior reatividade do folhelho frente à hidratação, que gera menor interação entre as camadas e que passam a poder ser fraturadas por baixa tensão mecânica. Mas a utilização de inibidores de reatividade frente à hidratação aumenta a resistência mecânica à ruptura do folhelho, provavelmente, devido à ocorrência de interações entre o inibidor e o folhelho. Os corpos de prova submersos em soluções poliméricas com catiônicos apresentaram uma maior resistência mecânica que os outros sistemas poliméricos estudados, provavelmente, devido à forte interação polímero – folhelho. Mas ao contrário do que aconteceu no ensaio de rolamento, o homopolímero catiônico de médio peso molecular foi mais eficiente, quanto à resistência mecânica, do que o copolímero catiônico, provavelmente, devido a maior interação com o folhelho, em consequência da presença de um número maior de grupos catiônicos no homopolímero, já que o copolímero apresenta um baixo grau médio de cationicidade.

Os resultados apresentados na Figura 5 mostram as diferenças na Deformação (mm) devido às diferentes interações químicas existentes entre o folhelho e os fluidos estudados.

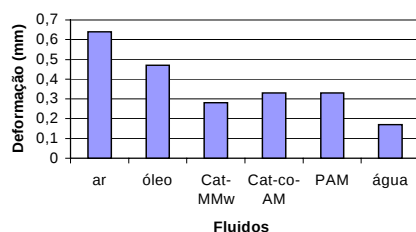


Figura 5. Comparação da Deformação (mm) dos corpos de prova do folhelho submersos em diferentes fluidos obtidas a partir do novo ensaio mecânico

Fluidos menos reativos (ar e óleo) proporcionam aos corpos de prova uma maior deformação que os mais reativos (água e soluções aquosas poliméricas). Pode-se observar que entre as soluções aquosas poliméricas, os corpos de prova submersos no homopolímero catiônico apresentaram uma menor deformação (0,28 mm). Apesar das diferenças na resistência mecânica à ruptura, discutida anteriormente, o copolímero catiônico e a poliacrilamida apresentaram a mesma deformação (0,33 mm).

Os resultados da Figura 6 mostram as diferenças no Módulo Elástico (MPa) obtidos pelos corpos de prova submersos em diferentes fluidos.

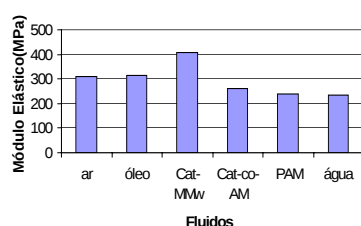


Figura 6. Comparação do Módulo Elástico (MPa) dos corpos de prova do folhelho submersos em diferentes fluidos obtidas a partir do novo ensaio mecânico

Os resultados da Figura 6 mostram que os corpos de prova submersos em óleo e ar apresentaram maior rigidez do que os submersos em água e soluções poliméricas de PDADMAC-co-AM e PAM. Os corpos de prova submersos em solução polimérica de PDADMAC-MMw apresentaram maior rigidez (409 MPa) que todos os demais sistemas estudados, embora tenham se mostrado menos resistentes do que aqueles submersos em fluidos menos reativos (ar e óleo).

A Figura 7 mostra os resultados obtidos da quantidade de água adsorvida (entre 30 – 150 °C) na superfície do folhelho, após serem submersos em diferentes fluidos e submetidos ao novo ensaio.

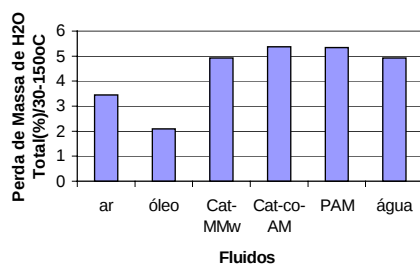


Figura 7. Comparação da quantidade de água adsorvida (entre 30 – 150 °C) na superfície dos corpos de prova do folhelho após submersos em diferentes fluidos e submetidos ao novo ensaio mecânico

Os resultados da Figura 7 mostram que os corpos de prova do folhelho submersos em ar, apresentam uma quantidade de água (3,5 %) que determina o estado mais estável do folhelho, onde ocorre a maior interação entre as camadas, tornando-o mais resistente à fratura. Pode-se observar que o estado mais estável do folhelho é alterado quando este entra em contato com fluidos com naturezas químicas diferentes, já que temos uma perda de massa de água menor em fluido com baixa reatividade ao folhelho (óleo mineral, 2,1 %) e uma perda maior em fluidos com alta reatividade ao folhelho (água, PDADMAC-MMw, PDADMAC-co-AM e PAM, ~ 5,0 %). Para os corpos de prova submersos em fluidos poliméricos, pode-se observar que a quantidade de água adsorvida é independente dos mecanismos envolvidos e das interações apresentadas pelos inibidores, já que apresentam a mesma quantidade de água adsorvida pelos corpos de prova submersos em água (~ 5,0 %), sugerindo que esta quantidade seja necessária para tornar o folhelho menos estável. Porém, eles são mais resistentes à fratura e apresentaram um maior tempo médio de duração do ensaio (9 min), em relação ao ensaio em água (7 min), retardando um pouco a velocidade de difusão da água para dentro do folhelho, como mostra a Figura 8.

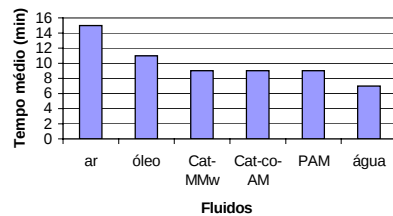


Figura 8. Tempo médio (min) de duração do ensaio para cada sistema fluido – folhelho estudados

Segundo Bailey e Keall (1994), a força direcional que causa a instabilidade do folhelho resulta da diferença nos potenciais químicos da água, íons do folhelho e do fluido de perfuração, pois à medida que a água difunde para dentro do folhelho, reduzindo o potencial químico, as interações entre as camadas são enfraquecidas e são rompidas pela ação mecânica, apesar da presença de um inibidor eficiente.

A Figura 9 mostra os resultados obtidos dos teores de carbono total (%) adsorvido na superfície do folhelho, após serem submersos em diferentes fluidos e submetidos ao novo ensaio.

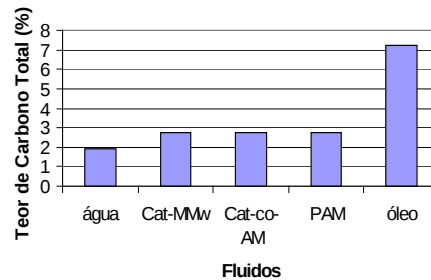


Figura 9. Comparação da quantidade de polímero adsorvido na superfície dos corpos de prova do folhelho

Os corpos de prova submersos em óleo apresentaram um maior teor de carbono total apesar da baixa reatividade ao folhelho. Esta adsorção provavelmente ocorre através das microfaturas e imperfeições presentes no folhelho. Para os corpos de prova submersos em fluidos poliméricos, pode-se observar que a quantidade de teor de carbono total foi a mesma, independente dos mecanismos envolvidos e das interações apresentadas pelos inibidores.

4. Conclusões

O novo ensaio mecânico submerso de flexão em três pontos, possibilitou avaliar, simultaneamente, os processos de natureza mecânica e química, envolvidos nas interações rocha – fluido de perfuração que contribuem para a instabilidade dos poços de petróleo. Conclui-se que as interações polímero – folhelho são responsáveis pela resistência mecânica do folhelho, pois a quantidade de água total e o teor de carbono total adsorvidos pelo folhelho foram as mesmas, independente do inibidor utilizado. Os resultados também sugerem que a instabilidade do folhelho seja devida à água adsorvida, já que independente do inibidor utilizado, a quantidade de água adsorvida foi a mesma que a encontrada no folhelho submetido à água. Utilizando-se inibidores, o folhelho permaneceu mais resistente à fratura e com um maior tempo médio de duração do ensaio, em relação ao ensaio em água, retardando um pouco a velocidade de difusão da água para dentro do folhelho.

5. Referências

- BAILEY, L., KEALL, M. Effect of Clay/Polymer Interactions on Shale Stabilization During Drilling. *Lang.*, v. 10, p. 1544, 1994.
- CHENEVERT, M.E., OSISANYA, S.O. Shale/Mud Inhibition Defined with Rig-Site Methods. *SPE Drilling Engineering*, September., p. 261, 1989.
- DARLEY, H.C.H., GRAY, G.R. *Composition and Properties of Drilling and Completion Fluids*, Gulf Publishing Company, 1988.
- GRIM, R.E. The Clay Mineral Conception. *Am. Ceram. Soc. Bull.*, v. 44, p. 687, 1965.
- HANDIM, J. On the Coulomb-Mohr Failure Criterion. *J. Geoph. Res.*, v. 74, n. 22, p. 5343-5347, 1989.
- LEE, L.T., et al. Adsorption of Polyacrylamides on the Different Faces of Kaolinites. *J. Col. Int. Sci.*, v. 147, n. 2, p. 351-357, 1991.
- MODY, F.K., HALE, A.H. Borehole-Stability Model to Couple the Mechanics and Chemistry of Drilling Fluid/Shale Interactions. *J. Petro. Techn.*, v. 45, n. 11, p. 1093, 1993.
- SANTOS, H. A New Conceptual Approach to Shale Stability. *Tese de Doutorado*, The University of Oklahoma, Oklahoma, 1997.

SCHMIDT, D.D., BEIHOFFER, T.W., DORROUGH, D.S., DEEM, C.K. Cationic Polymer Drilling Fluid Can Sometimes Replace Oil-Based Mud. *Oil and Gas J.*, mar., n. 16, p. 47, 1992.