

2 Revisão Bibliográfica

2.1. Considerações Gerais

Para o estudo do comportamento dos folhelhos quanto à estabilidade frente a diferentes fluidos de perfuração é necessário o melhor entendimento das forças que atuam nos processos que geram estas instabilidades. Segundo van Oort (1997), num folhelho estas forças podem ser divididas em mecânicas (tensões *in-situ*; poropressão e tensões intergranulares de cimentação) e forças fisico-químicas (força de van Der Waals, repulsão eletrostática e forças de atração e repulsão provenientes de hidratação/secagem dos argilominerais).

O entendimento dos processos de instabilização é de suma importância para o desenvolvimento de estratégias de perfuração que visem minimizar os efeitos danosos destas instabilidades. De um modo geral, a indústria tem utilizado o fluido de perfuração como ferramenta básica para o controle destas instabilidades com base em algumas propriedades como densidade, viscosidade, composição química e filtrado (Fontoura, 1996).

O enceramento de brocas, dispersão de cascalhos e rupturas por compressão ou tração descritos a seguir, são os principais problemas de instabilização em poços de petróleo.

2.1.1. Enceramento de Brocas ou “Bit-Balling”

O enceramento de brocas ocorre com muita frequência em formações de folhelhos. Os efeitos indesejáveis deste fenômeno compreendem a obstrução dos espaços entre os dentes das brocas, reduzindo a taxa de penetração do equipamento de perfuração e o bloqueio das saídas de fluido das brocas, diminuindo o seu resfriamento. Denota-se como causas primárias do enceramento de brocas: a deformação plástica do folhelho devido a um elevado nível de tensão nos dentes das brocas; a limpeza insuficiente do fundo do furo e a hidratação de

argilominerais quando se utiliza fluidos de perfuração base água, com conseqüente expansão dos fragmentos de rocha.

2.1.2. Dispersão de Cascalhos

A dispersão de cascalhos no sistema de fluido de perfuração refere-se à desintegração em fase aquosa dos cascalhos em partes cada vez menores devido ao efeito conjunto do alívio progressivo de tensões à medida que este cascalho se aproxima da superfície, da hidratação de argilominerais expansíveis na matriz do folhelho e da pressão de penetração do fluido de perfuração. A dispersão incontrolada dos cascalhos resulta no aumento de sólidos, causando mudanças na composição e nas características de viscosidade dos fluidos de perfuração. Um aumento do teor de sólidos pode levar a uma limpeza ineficiente do poço, e assim, gerar problemas qualificados como “stuck pipe”. Os sólidos originados do folhelho dispersos no fluido possuem baixa densidade, necessitando-se, desta forma, correções dispendiosas, como por exemplo, a adição de baritina para controle do peso do fluido de perfuração. Este problema é conhecido e minimizado com a utilização de inibidores de hidratação tipo KCl, NaCl e aditivos que impedem a desintegração, como os polímeros tipo PHPA (partially hydrolysed poly-acrylamide) (Hale & Mody, 1993; Kadaster *et al.* 1992).

2.1.3. Rupturas por Compressão ou Tração

A estabilidade do poço depende do controle das tensões efetivas ao redor deste ao longo do tempo. Os principais parâmetros operacionais para alcançar este objetivo são o peso de fluido de perfuração, a composição e o controle sobre a flutuação das pressões no poço. Os problemas de estabilidade relacionados com o fluido de perfuração são:

Ruptura à tração, também chamada fraturamento, provocada por um peso excessivo do fluido de perfuração comparado com a resistência à tração da rocha. A ruptura à tração apresenta fraturas com perda de circulação parcial ou total, levando a problemas para a manutenção da pressão hidrostática, necessária para

evitar a invasão de fluidos de outras formações pressurizadas para o interior do poço.

Ruptura à compressão, chamada de colapso, provocada por um peso insuficiente do fluido de perfuração comparado com a resistência da rocha e as tensões ao redor do poço. A ruptura à compressão pode se apresentar como uma diminuição do diâmetro do poço ou com desmoronamento das paredes, de acordo com o comportamento dúctil ou frágil das rochas solicitadas.

A invasão do fluido de perfuração por gradiente hidráulico ou difusão, devido ao gradiente químico, altera a composição do fluido de poros do folhelho resultando numa variação da pressão de hidratação (swelling) e poropressão na região ao redor do poço. Como consequência, a tensão efetiva pode ser fortemente reduzida e propiciar a ruptura por compressão ou ruptura por tração, devido à geração de tensões radiais.

A proposta deste trabalho é avaliar e compreender através de ensaios de interação rocha-fluido de perfuração os mecanismos de fluxo de água e íons (transporte de massa) associados a gradientes hidráulicos e químicos. Para isto foi desenvolvido um equipamento e metodologia de ensaios de forma a obter os parâmetros de transporte devido a estes gradientes que possam ser utilizados em análises de estabilidade de poços.

2.2. Estudos nesta Linha de Pesquisa

O transporte de massa (fluxo de água ou solutos) entrando ou saindo do folhelho pode ter uma grande influência nas poropressões, tensões, deformações e resistência da rocha ao redor do poço. Desta forma, a compreensão dos mecanismos que regem este transporte de massa são de fundamental importância quando se pretende garantir a estabilidade de poços perfurados neste tipo de rocha.

Segundo Lerman (1979), o fluxo de um material pode ser representado de forma genérica como um fator de proporcionalidade vezes uma força motriz (driving force) dada por um gradiente que pode variar ao longo do processo. Segundo Mitchel (1993), o transporte em meios porosos pode ser controlado por

gradientes de pressão, concentração, elétricos e de temperatura. Na Tabela 2. 1 são apresentados os mecanismos de fluxo que podem ocorrer em meios porosos.

No presente trabalho de pesquisa é investigado somente o transporte de água e íons devido a gradientes hidráulicos e químicos. O fluxo de água e íons provocado por estes gradientes são representados pelas conhecidas leis de Darcy e Fick, respectivamente. O fluxo de íons devido a um gradiente hidráulico (advecção) apesar de estar contemplado no estudo, pode ser desprezível devido à baixa permeabilidade dos folhelhos. Desta forma, serão apresentados a seguir alguns conceitos básicos necessários ao entendimento do processo de osmose, que é o fluxo de água devido a um gradiente químico.

Antes, porém, vale ressaltar que Olsen *et al.* (1990), apresentam um novo mecanismo chamado de “difusão osmótica” que consiste no arraste de água por solutos quando estes migram em direção a regiões menos concentradas. Este processo provoca o fluxo de água no sentido contrário ao da osmose e também pode ocasionar sérios problemas de instabilidade (Simpson & Dearing, 2000). Este processo, entretanto, não está contemplado nas análises realizadas neste trabalho.

Tabela 2. 1 – Transporte de massa em meios porosos (modificado de Mitchel, 1993)

Fenômeno Fluxo	Gradiente Hidráulico, ∇p	Gradiente químico, $\nabla \mu$	Gradiente de Temperatura, ∇T	Gradiente elétrico, ∇E
Fluido (água)	Condutividade Hidráulica (Lei de Darcy)	Osmose	Termo-osmose	Eletro-osmose
	Solutos (íon)		Advecção	Difusão (Lei de Fick)
Calor		Transferência de calor isotérmica	Efeito Dufour	Condutividade Térmica (Lei de Fourier)
Corrente	Corrente de Calor	Difusão de Corrente	Termo-eletricidade (Efeito Seebeck)	Condutividade Elétrica (Lei de Ohm)

O processo denominado osmose é caracterizado pelo fluxo de água de uma região menos concentrada para uma região mais concentrada. Quando dois fluidos de concentrações diferentes são separados por uma membrana semi-permeável perfeita, ou seja, permite somente a passagem de solvente e não de soluto (Figura

2. 1(a)), a água presente na solução menos concentrada flui para a região de maior concentração na tentativa de equilibrar o sistema, gerando assim um gradiente de pressão. A pressão necessária a ser aplicada no fluido mais concentrado para evitar o fluxo de água, é denominada de pressão osmótica e pode ser obtida pela eq. 2.1.

$$\Pi = \frac{RT}{V_w} \ln\left(\frac{a_1}{a_2}\right) \quad (2.1)$$

onde;

R = Constante universal dos gases (0,082 L . atm / mol . K);

T = Temperatura absoluta (Kelvin);

V_w = Volume parcial molar de água (0,018 L/mol);

a_1 = Atividade química da água na região de menor concentração;

a_2 = Atividade química da água na região de maior concentração.

A equação apresentada acima utiliza o conceito de atividade química (atividade) que está relacionada à energia livre das moléculas de água numa solução. A atividade de uma solução é a razão entre a pressão de vapor da água medida nesta solução e a pressão de vapor da água pura e é numericamente igual à umidade relativa do ar numa câmara fechada contendo a solução desejada. Soluções contendo altas concentrações de solutos possuem baixa atividade química.

Analisando uma situação de poço com o folhelho sendo considerado uma membrana semi-permeável perfeita, a pressão osmótica gerada pela diferença de concentração entre o fluido de perfuração e o fluido de poros do folhelho pode ser obtida pela eq. 2.2 (Mody & Hale, 1993).

$$\Pi = \frac{RT}{V_w} \ln\left(\frac{A_{fp}}{A_f}\right) \quad (2.2)$$

onde;

A_{fp} = Atividade do fluido de perfuração;

A_f = Atividade do folhelho.

Desta forma, a utilização de fluidos de perfuração mais concentrados que o fluido de poros existente nos folhelhos pode gerar um fluxo osmótico e retirar água da formação aumentando sua resistência. Este conceito não é novo, e já é

utilizado na indústria petrolífera há alguns anos. Chenevert (1970) mostra a eficiência desta técnica em fluidos de perfuração base óleo.

Nesta época, acreditava-se que o processo osmótico fosse aplicável somente para fluidos base óleo e que o sistema óleo/folhelho atuava como uma membrana semi-permeável perfeita. Entretanto, devido a exigências ambientais, os fluidos base óleo começaram a ser substituídos por fluidos base água em diferentes partes do mundo. Como conseqüência, formulações anteriormente utilizadas com sucesso em fluidos base óleo não se mostraram eficientes com fluidos base água, e vários problemas de instabilidade começaram a ocorrer. Em primeiro lugar, porque ao contrário dos fluidos base água, os fluidos base óleo geram barreiras impermeáveis a moderadas pressões diferenciais devido à alta pressão capilar no contato óleo/água nos poros do folhelho (van Oort, 1994), impedindo a invasão da formação e contribuindo, desta forma, para a melhoria da estabilidade. E, também, porque verificou-se que os folhelhos não atuam como uma membrana semi-permeável perfeita (Figura 2. 1(b)) quando se utiliza fluidos base água, ou seja, eles não impedem totalmente a passagem de íons (Simpson & Dearing, 2000; van Oort *et al.*, 1996; Tan *et al.*, 2002; Ewy & Stankovich, 2002).

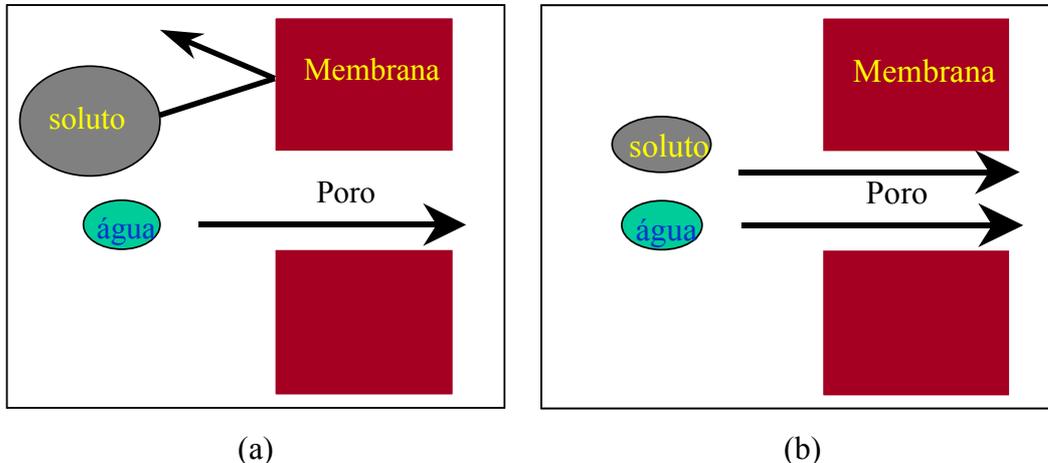


Figura 2. 1 – (a) Membrana semi-permeável perfeita (b) Membrana semi-permeável imperfeita (modificado de Mikulecky, 1997)

A capacidade que um folhelho tem de reter ou não a passagem de íons através de seus poros é expressa em termos da “eficiência de membrana” ou “coeficiente de reflexão” (α) definido pela eq. 2.3 (Katchalsky & Curran, 1965). Onde v_a e v_s são as mobilidades da água e do soluto, respectivamente.

$$\alpha = 1 - \frac{v_s}{v_a} \quad (2.3)$$

Desta forma, uma membrana semi-permeável perfeita é caracterizada por $v_s = 0$, $v_a \neq 0$ e $\alpha = 1$, o que significa que todos os solutos são refletidos pela membrana e somente moléculas de água podem passar. Uma membrana deixa de ser semi-permeável perfeita quando $v_s \neq 0$ e $0 < \alpha < 1$, neste caso a membrana exibe um certo nível de seletividade permitindo a passagem de alguns íons. Quando os solutos e a água têm igual mobilidade ($v_s = v_a$), $\alpha = 0$, significa que a membrana é imperfeita permitindo a passagem de água e de íons e nenhuma osmose é verificada neste sistema. Este é geralmente o caso de sistemas com grande condutividade hidráulica onde a convecção domina o processo de fluxo.

Segundo van Oort *et al.* (1995), a eficiência de membrana é função da capacidade dos folhelhos em restringir a entrada dos solutos pelo tamanho dos mesmos ou pela sua capacidade de retardar a passagem destes solutos por trocas catiônicas. Desta forma, este parâmetro é influenciado pelos componentes do fluido (tipo de íon, carga e estado de hidratação) e por propriedades do folhelho (mineralogia, CTC, grau de consolidação e confinamento que afetam a porosidade e a permeabilidade).

A verdadeira pressão osmótica (ΔP_{osm}), gerada num sistema onde a membrana seja o folhelho, ou seja, num sistema onde a membrana não é semi-permeável perfeita, deve levar em conta a eficiência de membrana (α) do mesmo, e pode ser obtida pela eq. 2.4 (van Oort *et al.*, 1996; Tan *et al.*, 2002; Ewy & Stankovich, 2002). Estes autores desenvolveram equipamentos específicos de forma a utilizar esta equação para estimativa do coeficiente de reflexão ou eficiência de membrana. A eq. 2.4 também será utilizada neste trabalho para determinação do coeficiente de reflexão.

$$\Delta P_{osm} = \alpha \Pi \quad (2.4)$$

A necessidade de quantificar em laboratório a invasão de fluido, a penetração da pressão e os parâmetros de transporte, assim como avaliar a performance estabilizadora de aditivos e as interações rocha-fluido, tem estimulado o desenvolvimento de novos equipamentos e ensaios, alguns dos quais serão descritos a seguir.

2.2.1. Equipamentos e Resultados Apresentados na Literatura

A determinação dos parâmetros de transporte em solos, especialmente a determinação do coeficiente de difusão, é amplamente estudada e vários trabalhos podem ser encontrados na literatura (Shackelford & Daniel, 1991; Rowe *et al.*, 1988; Ritter, 1998, Fontoura *et al.*, 1987, Nobre *et al.*, 1987). Estes trabalhos basicamente estudam transporte de contaminantes através de camadas de argila e utilizam métodos transientes de medida do coeficiente de difusão efetivo, tais como o método de coluna, o da meia célula e o método do reservatório duplo ou simples.

Barone *et al.* (1990), utilizaram o método da coluna modificada para realizar ensaios em folhelhos onde a concentração inicial das espécies químicas no reservatório fonte diminui ao longo do tempo. Os resultados são apresentados em gráficos de aumento de concentração ao longo do corpo de prova, e uma solução semi-analítica (dada pelo programa de computador Pollute (Rowe & Booker, 1983 e Rowe, *et al.* 1983) é utilizada para ajustar a curva teórica aos dados experimentais, de forma a determinar o coeficiente de dispersão hidrodinâmico. Este coeficiente é a soma da dispersão mecânica e da difusão molecular. Como o processo é controlado somente por difusão o valor obtido é igual ao coeficiente de difusão.

Ensaio realizados por Barone *et al.* (1990) no folhelho Queenston, apresentaram coeficientes de difusão efetivo para o Cl^- , a uma temperatura de 22°C , variando de $1,4 - 1,6 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$, o que corresponde a uma tortuosidade variando de 0,095 a 0,108, já que o coeficiente de difusão puro do Cl^- corresponde a $20,3 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$. Ensaio realizados num “mudstone” (lamito) apresentaram coeficientes de difusão efetivo para o mesmo íon variando de $1,5 - 2,0 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ a uma temperatura de 10°C (Barone *et al.*, 1992). Apesar de apresentar bons resultados, as condições de temperatura e pressão *in-situ* não são restabelecidas neste tipo de ensaio.

Ballard *et al.* (1992), executaram uma série de ensaios onde foi medida a velocidade de transporte por meio de traçadores radioativos. Isótopos de espécies já presentes no fluido de poros foram utilizados como traçadores e adicionados em

pequenas quantidades de forma que a concentração total de íons não fosse significativamente alterada. A Figura 2. 2 apresenta a configuração do ensaio realizado onde duas bombas independentes mantêm o fluido circulando nas duas extremidades do corpo de prova. Um dos reservatórios contém fluido de poro simulado e os traçadores, enquanto o outro (reservatório de medida), contém somente o fluido de poros simulado. O aumento da concentração dos traçadores no reservatório de medida é monitorado com o tempo e depois utilizado para calcular o coeficiente de difusão de cada elemento.

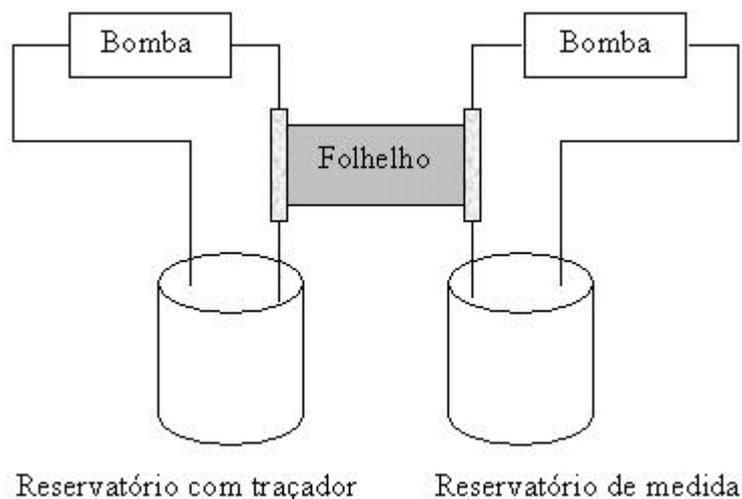


Figura 2. 2 – Esquema do equipamento utilizado por Ballard *et al.* (1992)

Verificou-se nos ensaios realizados por Ballard *op. cit.* que os folhelhos e argilas utilizadas não atuam como uma membrana semi-permeável devido à ausência de fluxo osmótico. Como não foi aplicado gradiente hidráulico o transporte de íons foi controlado pela difusão obtendo-se coeficientes da ordem de $1 - 10 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$.

Lomba (1998) realizou ensaios para verificar o transporte por difusão de água e íons através de folhelhos a níveis de tensão correspondentes àqueles utilizados durante a perfuração. Um equipamento (Figura 2. 3) foi projetado para aplicar pressões confinantes de até 41 MPa e medir a difusão de íons e água através de folhelhos utilizando traçadores radioativos. Neste equipamento circulava-se, à pressão atmosférica, o fluido de poros simulado pelas faces do folhelho que, em seguida, é submetido à pressão confinante desejada para o ensaio e deixado adensar até que as pressões cheguem ao equilíbrio. Após esta etapa concentrações pequenas de traçadores radioativos são adicionados em um dos reservatórios de

forma a não modificar a atividade química. A variação de concentração destes traçadores nos reservatórios é monitorada com o tempo e utilizada para a obtenção do coeficiente de difusão.

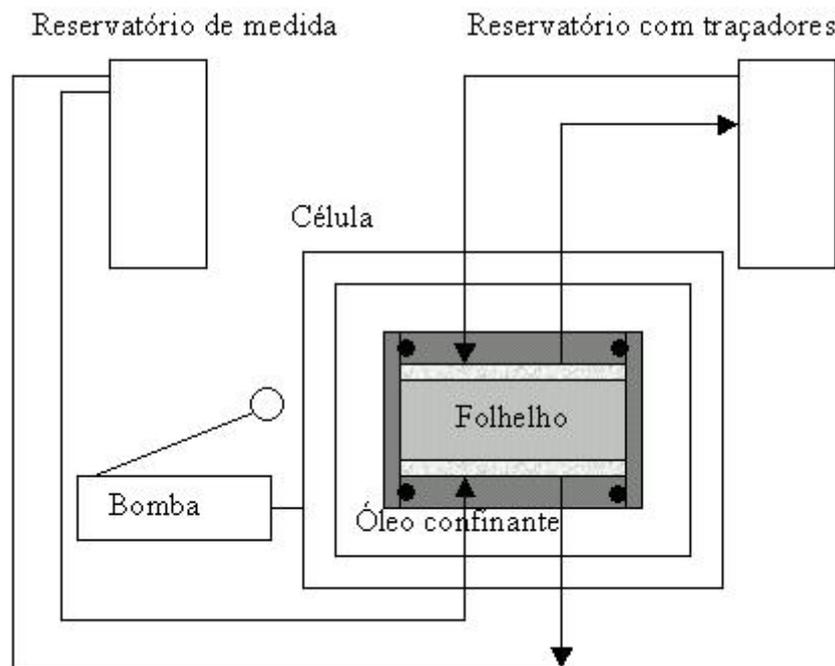


Figura 2. 3 – Esquema do equipamento utilizado por Lomba (1998)

Os ensaios foram realizados em corpos de prova de 5,08 cm de diâmetro e 0,50 cm de altura no folhelho Speeton do Mar do Norte retirado a profundidade média de 1.524 m. Os resultados mostraram que a difusão de íons e água diminuem com o aumento da pressão confinante, mas a completa restrição de fluxo iônico não é obtida nos fluidos base água. A maior velocidade do traçador radioativo da água (tritium), sugere que o fluxo osmótico pode ser o mecanismo predominante num estágio inicial, principalmente sob condições atmosféricas, mas o fluxo de íons é predominante num estágio mais avançado. Coeficientes de difusão da ordem de $1 - 10 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ foram obtidos para amostras confinadas a 30 e 37 MPa e valores de $5 - 96 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ foram obtidos em amostras sob condições atmosféricas.

Os valores de coeficientes de difusão obtidos por Lomba (1998) são inferiores aos obtidos por Ballard *op. cit.*, mesmo sob condições atmosféricas, evidenciando um maior fator de tortuosidade deste material. Este trabalho deixa claro que a realização de ensaios restabelecendo as tensões de campo é de

fundamental importância para avaliação do transporte de água e íons, além de constatar a existência do fluxo osmótico, o que não ocorreu em Ballard *op. cit.*.

Um equipamento similar ao apresentado anteriormente, chamado de Downhole Activity Cell (DAC), foi desenvolvido por Fonseca & Chenevert (1998). Este novo equipamento, além de possuir um termohigrômetro acoplado à célula, é capaz de aplicar pressões confinantes de 70 MPa e realizar ensaios a temperaturas de até 52 °C. Entretanto, não é capaz de simular condições triaxiais e nem trabalhar com poropressões superiores à atmosférica.

Van Oort (1994) utilizou dois equipamentos baseados no método transiente de transmissão de pressão para estudar as interações entre folhelhos e fluidos de perfuração e obter a permeabilidade dos mesmos. No primeiro equipamento, apresentado na Figura 2. 4, o corpo de prova com 2,5 cm de diâmetro e 0,75 cm de comprimento é colocado entre dois reservatórios contendo inicialmente um simulado do fluido de poros. De forma a obter a permeabilidade do corpo de prova, simplesmente aplica-se um gradiente de pressão no reservatório superior, enquanto monitora-se a evolução da pressão no reservatório inferior. Vale lembrar que neste equipamento não se aplica pressão confinante, sendo o isolamento entre os reservatórios realizado por anéis de borracha (O’rings).

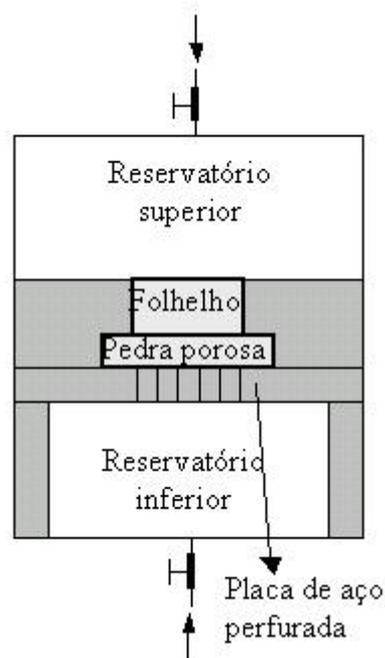


Figura 2. 4 – Esquema do equipamento utilizado por van Oort (1994)

Van Oort (1994) apresenta uma metodologia analítica para estimativa do coeficiente de permeabilidade que também foi utilizada nas fases iniciais do presente trabalho. Ensaios realizados em diferentes folhelhos (Mancos, Pierre, Heather e Nigerian), verificaram permeabilidades maiores para os folhelhos retirados de grande profundidade. Análises em microscópio eletrônico de varredura mostraram que estes folhelhos apresentam microfissuras responsáveis pela alta permeabilidade observada.

Ensaios realizados no folhelho Pierre utilizando diferentes fluidos de perfuração mostraram que fluidos à base de óleo e pseudo-óleos não invadem o folhelho em função da alta pressão capilar no contato óleo/água a moderadas pressões diferenciais, o que não é verificado nos ensaios com fluidos à base de água. A Figura 2. 5 apresenta um ensaio de transmissão de pressão realizado no equipamento da Figura 2. 4 que ilustra o comentário acima. Observa-se que o fluido de poro penetra no folhelho e aumenta a pressão no reservatório inferior, o que não ocorre com o fluido base óleo.

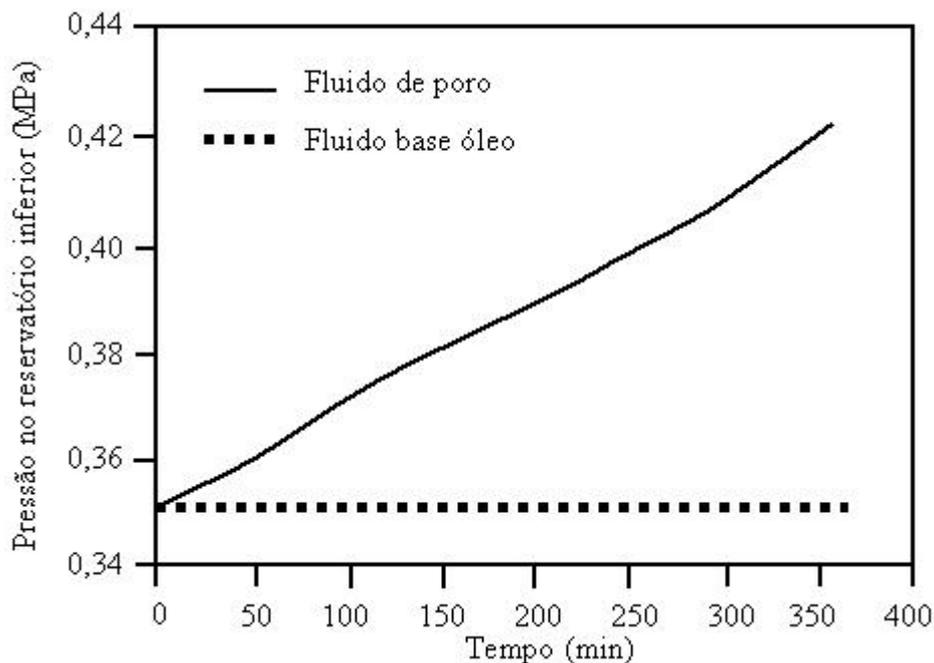


Figura 2. 5 – Ensaio de transmissão de pressão para fluido base óleo (van Oort, 1994)

De forma a restringir a invasão nos folhelhos verificada nos ensaios com fluidos à base de água, foram realizados ensaios utilizando aditivos de alto peso molecular, como bentonita e os xc-polímeros, não sendo verificada nenhuma melhoria quanto à invasão de fluidos na formação. Os autores atribuíram isto ao

fato dos aditivos aumentarem a viscosidade da solução e não a do filtrado. Desta forma, foram realizados ensaios utilizando viscosificantes de baixo peso molecular (CaCl_2) capazes de invadir a formação e aumentarem a viscosidade do filtrado, mostrando claramente o aumento da restrição a invasão nos folhelhos.

Outra forma de reduzir a velocidade de invasão de fluido e a penetração da poropressão é a criação de uma barreira impermeável no contato do folhelho (Bol *et al.*, 1992). Desta forma, uma solução de TAME (Thermally Activated Mud Emulsion) e outra com concentração de 10% em volume de silicato foram testadas com sucesso, não sendo observada nenhuma penetração de fluido ou pressão.

Um outro equipamento apresentado na Figura 2. 6 capaz de restabelecer as condições de pressão e temperatura *in-situ*, também foi utilizado por van Oort, (1994). Os ensaios realizados neste equipamento mostraram que a permeabilidade dos corpos de prova varia em função da pressão confinante efetiva aplicada, e que é possível gerar um fluxo osmótico no sentido contrário ao fluxo hidráulico utilizando soluções salinas.

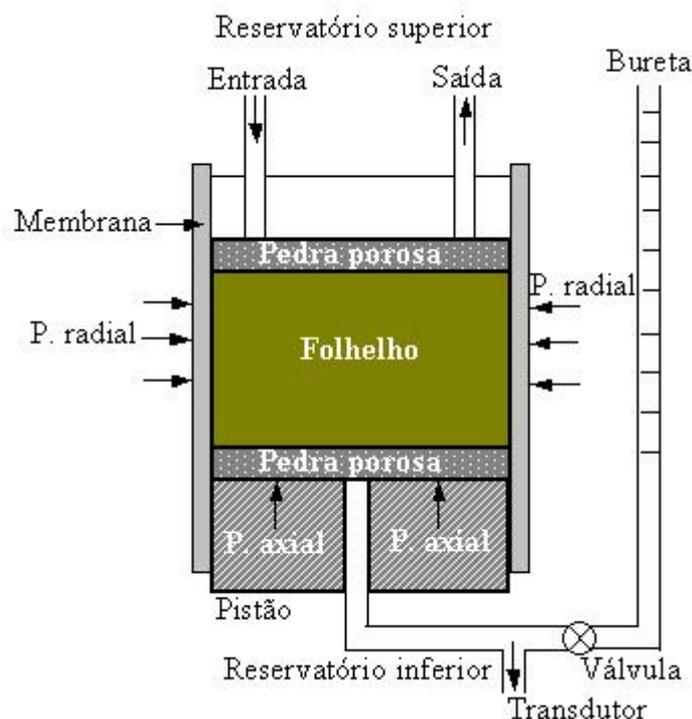


Figura 2. 6 – Esquema do equipamento de transmissão de pressão e ensaios de osmose (modificado de van Oort *et al.*, 1996)

A Figura 2. 7 apresenta um dos ensaios de fluxo osmótico realizado no folhelho Pierre a temperatura de 65 °C e pressão confinante de 5 MPa. O corpo de

prova foi submetido a uma diferença de pressão de 3,5 MPa por aproximadamente 10 dias, até a pressão no reservatório inferior se igualar à pressão no reservatório superior. Após esta fase, substituiu-se no reservatório superior o fluido de poros por uma solução 35% em peso de CaCl_2 , o que provocou uma rápida queda de pressão no reservatório inferior, evidenciando-se o contrafluxo osmótico. A análise química do fluido presente no reservatório inferior constatou a presença de íons Ca^{++} , indicando que o folhelho não atua como uma membrana semi-permeável perfeita, o que explica a retomada de crescimento da pressão no reservatório inferior.

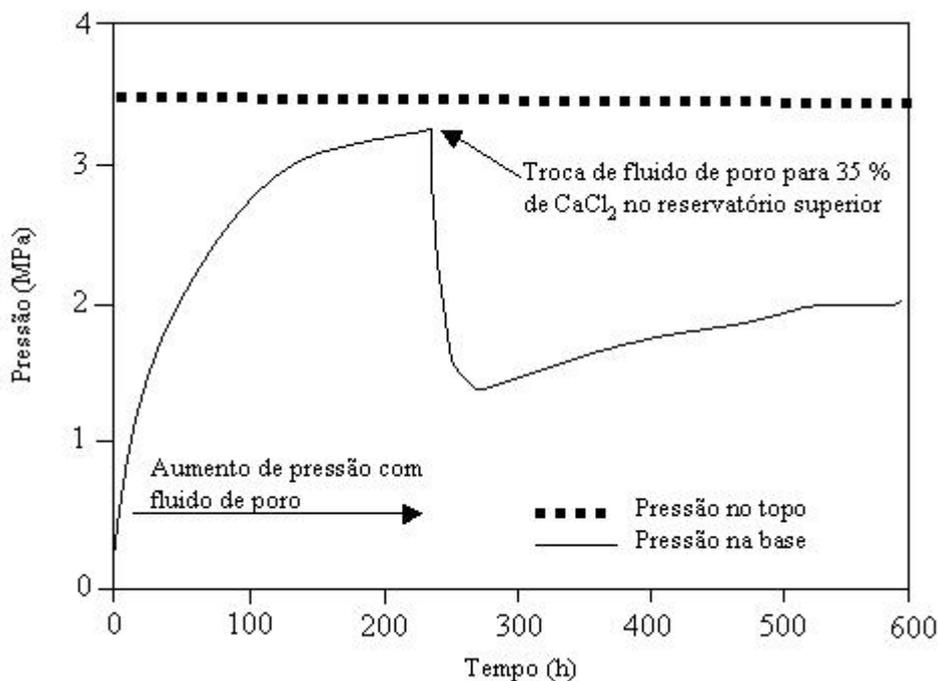


Figura 2. 7 – Ensaio de fluxo osmótico (van Oort, 1994)

Van Oort (1994) conclui que a estabilidade de folhelhos requer o isolamento entre o poço e a formação, podendo este objetivo ser alcançado aumentando-se a viscosidade do filtrado; reduzindo-se a permeabilidade do folhelho; gerando-se um fluxo osmótico de forma a contrapor o fluxo hidráulico ou, se possível, uma combinação destes três fatores.

Uma outra linha de pesquisa experimental vem sendo desenvolvida utilizando-se o equipamento DSC (Downhole Simulation Cell), no Laboratório da OGS (O'Brien-Goins-Simpson & Associates) em Houston-Texas, em estudos patrocinados pelo Gas Research Institute (GRI) para melhor compreender as interações folhelho-fluido de perfuração sob condições próximas às de poço.

Neste equipamento os corpos de prova que podem ter até 17,8 cm (7") de diâmetro e 22,9 cm (9") de comprimento, são montados entre dois "caps" e envolvidos por uma membrana de poliuretano. O diâmetro do corpo de prova é um quarto de polegada menor que a membrana, criando assim, um canal que é preenchido com areia de Ottawa, com granulometria variando de 20 a 30 mesh. Um tubo através dos "caps" permite monitorar a pressão no canal que originalmente era preenchido com óleo e que atualmente foi modificado (Simpson *et al.* 1995) permitindo a utilização de qualquer tipo de fluido. A pressão confinante é aplicada hidraulicamente por fora da membrana de poliuretano, sendo transmitida através do dreno de areia para o folhelho. As condições *in-situ* são aplicadas no corpo de prova que após um período de estabilização é perfurado com broca, normalmente, de 1 (uma) polegada de diâmetro. Concluída esta etapa, a broca é retirada e um tubo simulando a coluna de perfuração é introduzido no furo. Um fluxo contínuo do fluido de perfuração é mantido durante o período desejado para avaliar os problemas de instabilidade. A Figura 2. 8 apresenta uma vista de topo do equipamento utilizado.

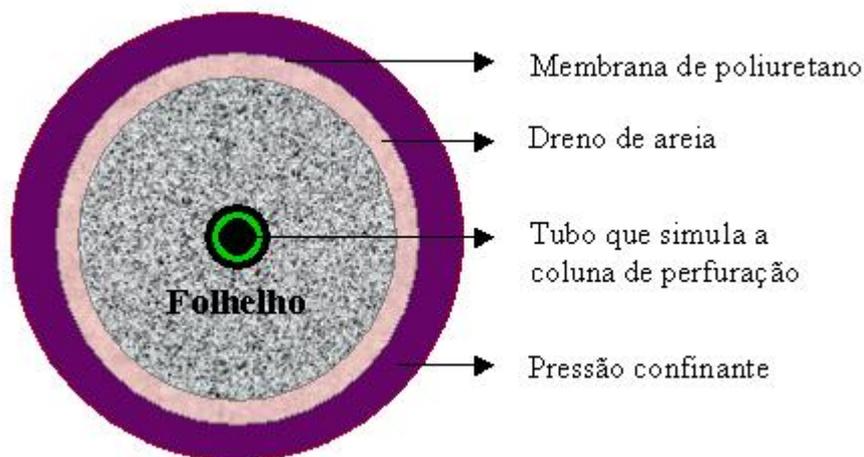


Figura 2. 8 – Esquema da célula DSC (modificado de Simpson & Walker, 1995)

A grande vantagem deste equipamento é que, além de poder simular as condições de temperatura e pressões *in-situ*, permite medir a quantidade de fluido que entra ou sai do corpo de prova através do aplicador de poropressão do dreno de areia. Após a avaliação do transporte de fluido entrando ou saindo do folhelho, a pressão interna do poço é reduzida gradualmente até a ruptura do mesmo, obtendo-se assim, medidas relativas ao efeito do fluido de perfuração na resistência do folhelho testado.

Atualmente este equipamento é o que melhor reproduz as condições de campo para realizar ensaios de interação rocha-fluido. Entretanto, é muito caro a realização de ensaios neste equipamento, necessitando-se de grandes quantidades de testemunho para preparação dos corpos de prova e além disso, não permite a obtenção dos parâmetros de transporte.

Simpson & Walker (1995, 1996) realizaram estudos na célula DSC em amostras do folhelho Speeton, considerado um dos mais problemáticos do Mar do Norte quando perfurado com fluidos base água. Ensaios foram realizados com vários fluidos de perfuração a diferentes concentrações e gradientes hidráulicos para avaliar as interações folhelho-fluido de perfuração. Os autores concluíram que a pressão osmótica pode ser ajustada em função da atividade do fluido de perfuração para que ocorra a transferência de água entrando ou saindo do folhelho. Entretanto, mesmo que a água seja retirada do folhelho devido à baixa atividade do fluido de perfuração, os íons presentes nestes fluidos penetram por difusão e podem provocar problemas de instabilidade no poço.

Simpson & Dearing (1999, 2000) deixam clara a importância da difusão e da chamada “difusão osmótica” como mecanismos de instabilização de folhelhos. A difusão osmótica provoca a transferência de solutos e água no sentido oposto ao fluxo osmótico, aumentando, desta forma, a pressão de poros e a umidade na vizinhança do poço. Outra verificação importante apresentada neste trabalho é a de que a atividade do folhelho, medida em condições ambientes, não corresponde à atividade verificada sob pressões e temperaturas similares às condições de poço. Segundo Onaisi *et al.* (1994), esta redução da atividade em condições ambientes ocorre devido ao desenvolvimento de altas pressões de sucção, decorrentes do alívio de tensões experimentada pela rocha.

Fonseca & Chenevert (1998) através de ensaios realizados em quatro tipos de folhelhos na célula DAC, mostraram claramente o aumento da atividade em função do aumento da pressão e da temperatura. Segundo Santos (1997), a distribuição de água dentro do folhelho é muito complexa, sendo altamente improvável a existência de uma única atividade em todo o folhelho. Além disso, corpos de prova não saturados são utilizados na medida da atividade química, não sendo razoável considerar que a medida realizada seja representativa das condições de poço.

Van Oort *et al.* (1996), utilizando o equipamento apresentado na Figura 2. 6 em corpos de prova (2,5 x 2,5 cm) do folhelho Pierre I, apresentaram uma série de ensaios de transmissão de pressão e fluxo osmótico para diferentes fluidos e concentrações. Ensaios na célula DSC também foram realizados de forma a verificar o aumento de resistência provocado por diferentes fluidos.

Ensaios de fluxo osmótico nas soluções de 35 % de CaCl_2 , 26 % de KCl e 16 % de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, apresentaram coeficientes de reflexão de 0,014, 0,019 e 0,09, respectivamente. Segundo os autores um valor maior do coeficiente de reflexão para o $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ já era esperado visto que os íons Al^{3+} e SO_4^{2-} apresentam um maior raio hidratado que os íons Ca^{2+} , K^+ e Cl^- . Desta forma, o transporte destes íons é restringido pelo tamanho dos poros do folhelho.

Um ensaio com uma solução 72 % de KCOOH , que apresenta uma baixa atividade (0,38), foi realizado na célula DSC. Neste ensaio, observou-se uma forte desidratação do folhelho no entorno do poço com uma conseqüente queda da poropressão e aumento de resistência. Ao mesmo tempo, verificou-se uma invasão de K^+ indicando que o folhelho não atua como uma membrana semi-permeável perfeita.

Tan *et al.* (1996) realizaram ensaios no equipamento apresentado na Figura 2. 9 em corpos de prova do folhelho Pierre II com 38,8 mm de altura e circulando uma solução 20 % em peso de NaCl . Estes ensaios foram realizados variando-se a pressão confinante efetiva de forma a avaliar o seu efeito no coeficiente de reflexão. A Tabela 2. 2 apresenta a máxima queda de pressão (P_{osm}) observada no ensaio, a permeabilidade do corpo de prova e o coeficiente de reflexão obtido, considerando a pressão osmótica teórica (Π), gerada pela solução 20 % em peso de NaCl , igual a 13,83 MPa.

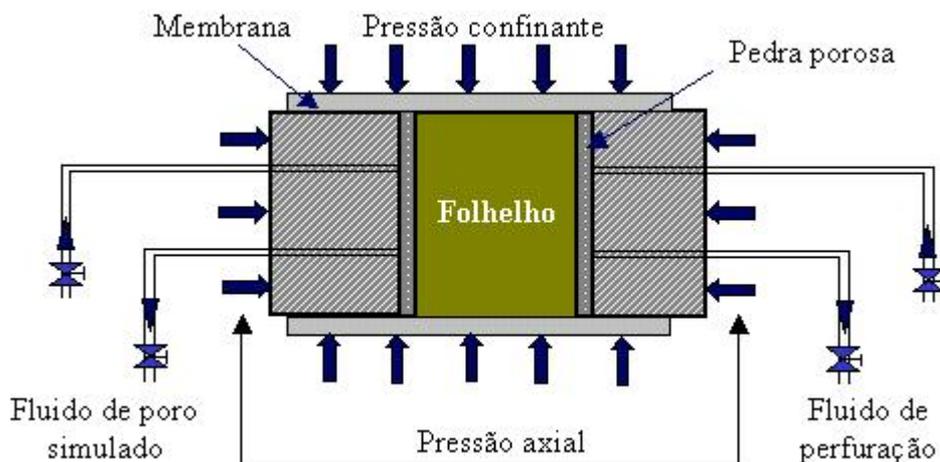


Figura 2. 9 – Célula para ensaios de potencial químico (modificado de Tan *et al.* 1996)

Tabela 2. 2 – Resultados obtidos no folhelho Pierre II (Tan *et al.* 1996)

Corpos de prova (porosidade = 36 %)				
Ensaio	1	2	3	4
Pressão confinante efetiva (MPa)	2,43	9,48	16,38	26,62
Máxima queda de pressão (MPa)	0,85	1,26	1,29	1,47
Permeabilidade (μD)	0,113	0,053	0,036	0,036
Coefficiente de reflexão	0,061	0,091	0,093	0,106

Em trabalho mais recente, Tan *et al.* (2002) apresentam ensaios com o folhelho Pierre II realizados no equipamento da Figura 2. 9, numa célula triaxial servo-controlada e numa célula triaxial de alta pressão. Segundo os autores mais de 300 ensaios foram realizados e coeficientes de reflexão variando de 0,55 a 0,85 foram obtidos para novos fluidos base água.

Tan *et al.* (2002) não revelam a composição dos fluidos utilizados, contudo apresentam a metodologia para se obter tão elevada eficiência de membrana. Segundo os autores, os compostos utilizados são solúveis em soluções com pH variando entre 10 e 12, e quando estes fluidos entram em contato com o fluido de poros do folhelho, cujo pH varia entre 5 e 7, ocorre uma polimerização com possível precipitação, preenchendo os poros do folhelho com material sólido e, conseqüentemente, aumentando a eficiência de membrana. Estes autores acreditam que a utilização destes compostos nos fluidos de perfuração base água seja a nova tendência na indústria petrolífera.

Ewy & Stankovich (2002), utilizam o equipamento apresentado na Figura 2. 10 para realizar ensaios em corpos de prova com 1,9 cm de diâmetro e 1,3 cm de altura. Este equipamento permite a aplicação de elevadas pressões confinantes (35 MPa) e contrapressões (17 MPa), medidas de deformações axial e radial por meio de LVDT's e, também, medidas de velocidade acústica na direção axial. Estes autores saturam o corpo de prova por confinamento de forma a impedir o contato do fluido a ser utilizado no ensaio com o fluido de poros do folhelho. Para medidas de poropressão utiliza-se um minitransdutor de pressão instalado no “cap” inferior.

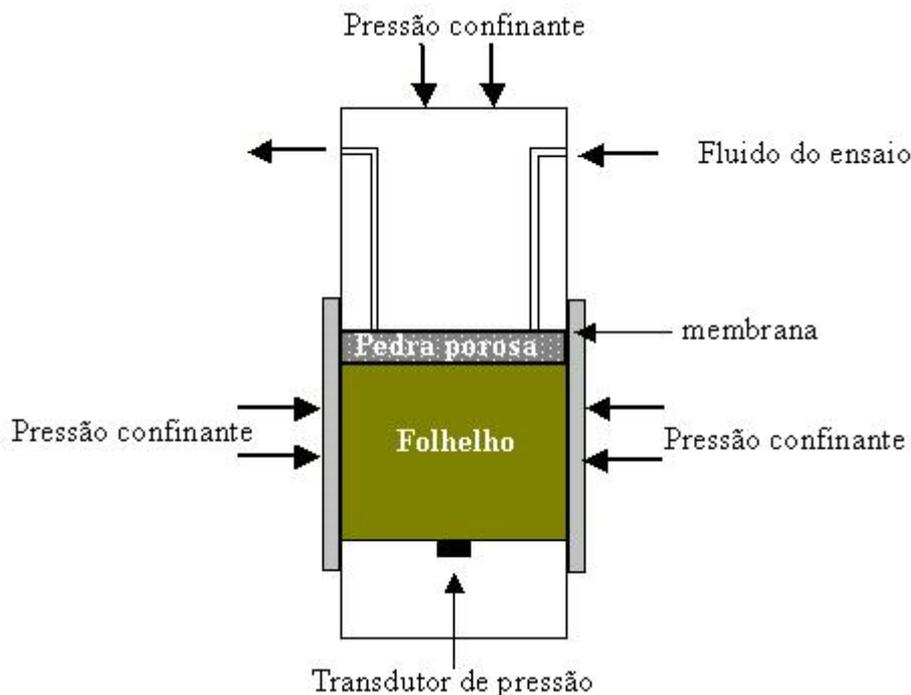


Figura 2. 10 – Esquema do equipamento utilizado por Ewy & Stankovich (2002)

Ensaio foram realizados em três folhelhos com soluções de NaCl, CaCl₂ e KCl a diferentes concentrações, obtendo coeficientes de reflexão ou eficiência de membrana menores que 0,05 em dois deles, e entre 0,15 e 0,25 para um folhelho altamente compactado e de baixa permeabilidade (0,1 nD). Os ensaios mostraram que a pressão osmótica independe das variações da pressão confinante e pressão no poço quando a atividade do fluido de perfuração for menor que a do folhelho, e que esta pressão independe do sal utilizado e sim da atividade química das soluções. Entretanto, verificou-se que se a atividade do fluido de perfuração for maior que a do folhelho, a pressão osmótica varia com a pressão confinante e com a pressão no poço devido a ocorrência de expansão (swelling) no folhelho.

2.3. Considerações Finais

As pesquisas direcionadas ao entendimento mais profundo dos mecanismos que provocam instabilidades em poços de petróleo, devido à interação entre os folhelhos e fluidos de perfuração base água, tiveram seu início somente a partir dos meados dos anos 80, quando legislações ambientais começaram a proibir a utilização de fluidos base óleo em várias partes do mundo. Esta é sem dúvida uma das razões da existência de poucos equipamentos e centros de pesquisa envolvidos neste tipo de trabalho.

O foco desta tese é o desenvolvimento de um equipamento capaz de restabelecer as condições de pressão no campo e realizar ensaios de interação rocha-fluido de perfuração. O trabalho tem como objetivo a obtenção dos parâmetros de transporte devido a gradientes hidráulicos e químicos que possam servir de “input” em análises de estabilidade de poços.

A revisão apresentada mostra equipamentos importantes na avaliação da interação folhelho-fluido de perfuração, mas que muitas vezes apresentam simplesmente resultados qualitativos desta interação. A quantificação com a determinação dos parâmetros de transporte passa a ser fundamental para alimentar simuladores de estabilidade de poços cada vez mais poderosos. Além disso, alguns procedimentos para realização de ensaios são questionáveis e podem mascarar resultados ou fornecer valores irreais.

Na maioria dos equipamentos apresentados acima não se realiza uma etapa adequada de saturação do corpo de prova. Normalmente simplesmente aplica-se as pressões desejadas para o ensaio e aguarda-se um período de estabilização. Segundo Onaisi *et al.* (1994), a falta de saturação introduz efeitos capilares que podem significativamente alterar as interações fluido-folhelho. Ewy & Stankovich (2002), apesar de realizarem a saturação por confinamento impedindo o contato do folhelho com qualquer outro fluido antes do ensaio de interação propriamente dito, mantém as drenagens abertas para atmosfera e não medem o parâmetro de poropressão B.

Outro ponto importante é a falta de uma metodologia adequada para o adensamento do corpo de prova. Entretanto, os trabalhos citados acima muito contribuíram para o entendimento dos mecanismos atuantes na interação entre folhelhos e fluidos de perfuração, sendo utilizados como referência para avaliação e comparação dos resultados oriundos da presente pesquisa.