

### **3**

## **Descrição do Equipamento e da Metodologia de Ensaios**

### **3.1.**

#### **Introdução**

Neste Capítulo são apresentados os diferentes constituintes do equipamento utilizado para realização dos ensaios desta dissertação de mestrado. A célula de difusão utilizada foi desenvolvida por Muniz (2003) em sua tese de doutorado e apresentada ao Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio. As melhorias implementadas no sistema de ensaio, realizadas durante o desenvolvimento deste trabalho, também são apresentadas.

A metodologia utilizada para a realização dos ensaios foi praticamente a mesma desenvolvida por Muniz (2003). Porém, devido a introdução de novos elementos no sistema de ensaios, alguns procedimentos são apresentados em maior detalhe, como por exemplo a colocação de fluido real de perfuração na interface desenvolvida.

### **3.2.**

#### **Equipamentos e Acessórios Utilizados**

A célula de difusão utilizada foi usinada em aço carbono 4140 de alta resistência e projetada para realizar ensaios com pressões confinantes de até 30 MPa. A parte superior da célula de difusão é fixada a base por meio de 8 parafusos 5/8". Para se evitar a corrosão das peças que constituem a célula quando em contato com soluções salinas, à base recebeu uma niquelagem e a parte superior (tampa) recebeu uma camada protetora de zinco. A Figura 3. 1 apresenta o esquema da célula de difusão utilizada.

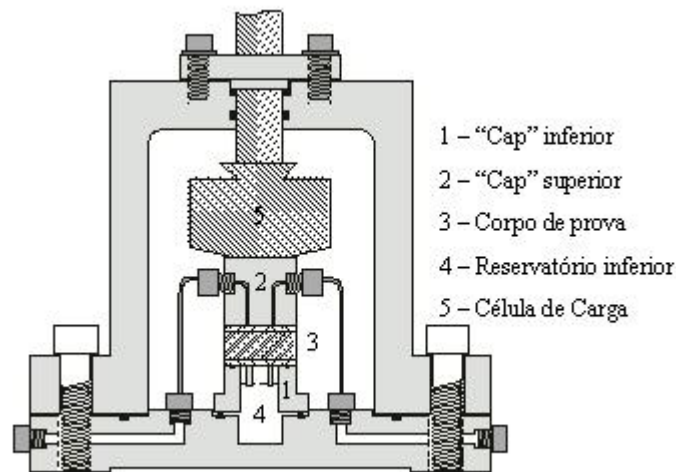


Figura 3. 1 – Esquema da célula de difusão desenvolvida (Muniz, 2003)

Neste equipamento pode-se realizar ensaios com carregamento isotrópico ou anisotrópico em corpos de prova de 1,5” (38,1 mm) ou 2” (50,8 mm) de diâmetro e uma altura máxima de 30 mm. Nos ensaios com carregamento anisotrópico utiliza-se uma célula de carga apoiada sobre o “cap” superior para medir a força desviadora aplicada, enquanto todo o conjunto é submetido à pressão confinante. Embora o equipamento possibilite este tipo de ensaio, nesta dissertação todos os testes foram realizados sob carregamento isotrópico.

A aplicação de pressão é realizada por meio de dois aplicadores de pressão tipo GDS, um com capacidade de 2 MPa (Figura 3. 2) e outro mais robusto com capacidade de 32 MPa (Figura 3. 3). O GDS controla a quantidade de líquido (água deaerada ou óleo) que entra e sai do mesmo para a manutenção da pressão, sendo capaz de garantir uma pressão constante por longos períodos de tempo. A pressão confinante é aplicada por um canal que atravessa a base da célula de difusão e chega ao interior da mesma.



Figura 3. 2 – Aplicador de pressão GDS de 2 MPa

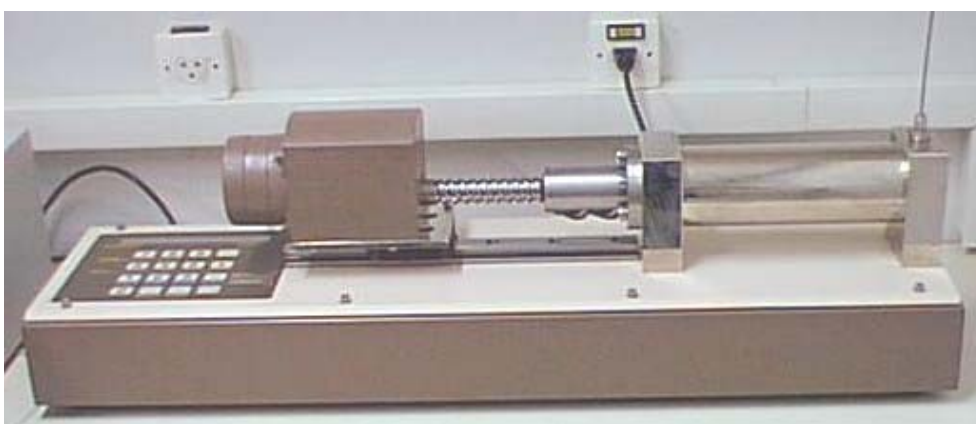


Figura 3. 3 – Aplicador de pressão GDS de 32 MPa

De forma a mensurar as pressões aplicadas, utilizam-se cinco transdutores da marca “Validyne” com capacidade de 21 MPa ou 3000 psi (Figura 3. 4). Estes transdutores monitoram a pressão confinante, a pressão na interface tipo pistão e as pressões no reservatório inferior e superior. Dois transdutores monitoram a pressão no reservatório superior, sendo um colocado na entrada e outro na saída da câmara. Caso ocorra variação entre essas duas leituras, devido à perda de carga nas linhas, adota-se o valor médio para pressão no reservatório superior ou topo do corpo de prova. A leitura do transdutor localizado na interface tipo pistão serve somente como referência para a pressurização e despressurização da interface.



Figura 3. 4 – Transdutores de pressão de 21 MPa

O circuito de aplicação de pressão no topo é constituído basicamente pela bomba “Waters” e por uma válvula de alívio. A bomba da marca “Waters” é uma bomba de vazão constante capaz de imprimir no sistema vazões que variam de 0,001 a 10 ml/min, e aplicar pressões de até 42 MPa ou 6000 psi (Figura 3. 5). A pressão na linha de circulação é mantida através do uso de uma válvula de alívio da marca “Swagelok” (Figura 3. 6) cuja faixa de trabalho pode ser alterada em função da troca de uma mola interna. A mola azul trabalha na faixa de 0,35-2,5 MPa, a amarela de 2,5-5,0 MPa, a roxa de 5,0-10,0 MPa, a laranja de 10,0-15,5 MPa e a marrom de 15,5-20,5 MPa. Desta forma, a pressão no topo do corpo de prova é aplicada impondo-se uma vazão constante na bomba “Waters” e regulando-se a válvula de alívio para a pressão desejada ao longo do ensaio.



Figura 3. 5 – Bomba “Waters”



Figura 3. 6 – Válvula de alívio “Swagelok”

A bomba “Waters” só pode trabalhar com água pura ou óleo, desta forma, para armazenamento e introdução de fluidos reais de perfuração e fluidos salinos no sistema, foi desenvolvida uma interface tipo pistão usinada com aço inox 316L (Figura 3. 7). Esta nova interface foi desenvolvida de forma a substituir a anteriormente utilizada por (Muniz, 2003) cuja pressão máxima de trabalho era de 5,0 MPa. A nova interface tem capacidade de 1,3 litros de fluido e foi projetada para suportar pressões de até 35 MPa ou 5000 psi. A tampa da interface é rosqueada e a separação dos fluidos realizada por meio de um pistão de teflon com anel de borracha nitrílica (“o’ring”) com dureza de 90 shore, de forma a impedir que os diferentes fluidos presentes nestes dois reservatórios entrem em contato e se misturem. Ensaios foram realizados com a interface de forma a verificar vazamentos e a operacionalidade da mesma, não sendo constatado qualquer problema.

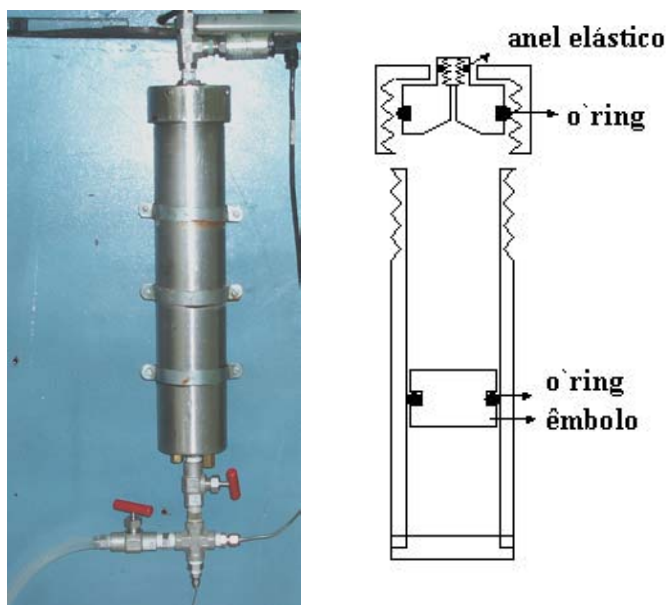


Figura 3. 7 – Nova interface tipo pistão – esquema ao lado

Durante o desenvolvimento desta dissertação dois novos “caps” superiores foram projetados e construídos em aço inox 316L, de forma a permitir a realização de ensaios utilizando fluidos reais de perfuração em corpos de prova com diâmetro de 38,1 e 50,8 mm (1,5 e 2 polegadas). Os “caps” inferiores foram os mesmos utilizados por Muniz (2003). A Figura 3. 8 apresenta uma foto com o “cap” inferior e superior utilizado por Muniz (2003) e o novo “cap” superior com diâmetro de 38,1 mm (1,5 polegada) utilizado nesta dissertação. A diferença básica entre os “caps” superiores encontra-se na substituição dos tubos de aço inoxidável de 1,58 para 3,18 mm (1/16 para 1/8 de polegada). Esta modificação foi necessária, pois durante a circulação de fluido pelo topo do corpo de prova, em função da alta viscosidade dos fluidos reais de perfuração, gera-se uma grande perda de carga ou até mesmo entupimento da tubulação de 1,58 mm (1/16 polegadas), fato este que é minimizado na tubulação de 3,18 mm (1/8 de polegada). Como pode ser visto na Figura 3. 8, a conexão do “cap” superior com a base da célula de difusão é realizada por meio de engate rápido tipo miniatura.



Figura 3. 8 – “Caps” superiores e inferior para corpos de prova de 38,1 mm

A Figura 3. 9 apresenta uma foto com os “caps” inferior e superior utilizados nos ensaios com corpos de prova de 50,8 mm (2 polegadas). O “cap” inferior (à esquerda) possui furos e sulcos profundos objetivando maximizar a área de contato entre o fluido utilizado e o corpo de prova. Entretanto, esta configuração propicia a extrusão do corpo de prova sendo necessária a utilização de um disco poroso de plástico (Muniz, 2003). Já o novo “cap” superior (à direita) é maciço e foi projetado de tal forma que o fluxo no topo do corpo de prova se dê obrigatoriamente pelo dreno de tela metálica e geotêxtil (bidim) que é instalado entre o “cap” e o corpo de prova. Esta configuração garante que o fluido utilizado entre em contato com toda a face superior do corpo de prova.



Figura 3. 9 – “Caps” de topo e da base de 50,8 mm



Como elementos selante em todo o equipamento são utilizados “o’rings”. Todos os cálculos utilizados no dimensionamento do equipamento e desenhos detalhados são apresentados por (Muniz *et al.*, 1999 e Carvalho *et al.*, 1999).

### 3.2.1. Sistema de Aquisição de Dados

Outra modificação importante no equipamento de ensaios realizada ao longo desta dissertação foi a substituição do sistema de aquisição de dados. Inicialmente, utilizava-se o programa AqDados para Windows, desenvolvido pela LYNX Tecnologia Eletrônica, em conjunto com uma placa de conversão A/D com capacidade para 8 canais de entrada analógica, sendo 4 canais diferenciais e 4 canais simples. A placa tinha resolução de 12 bits e a taxa de amostragem máxima de 50 kHz/canal. A partir de Janeiro de 2003 todo este sistema foi substituído por equipamentos e software (Labview) da National Instruments.

O novo sistema de aquisição de dados é composto de um condicionador de sinais (Figura 3. 10) e uma placa de 16 bits com uma taxa de amostragem máxima de 100 ks/s. Esta placa de aquisição, ao contrário da anterior de 8 canais, possui um multiplexador e pode ler até 32 canais simultaneamente, além de possuir 2 canais de saída para controle de instrumentos. Atualmente todos os instrumentos de medição são alimentados com uma mesma voltagem (10 volts) utilizando para isto a fonte apresentada na Figura 3. 11.



Figura 3. 10 – Condicionador de sinais do sistema de aquisição de dados





Figura 3. 11 – Fonte de energia

Diferentes programas para aquisição em Labview, denominados VI's, foram desenvolvidos e testados no Laboratório de Interação Rocha-Fluido do GTEP (Barcik & Muniz, 2003). Estes programas são gerados e utilizados pelo Labview e servem de interface para controlar, através de um micro computador, a placa de aquisição de dados que pode adquirir, monitorar e controlar diferentes instrumentos simultaneamente. A Figura 3. 12 apresenta a janela de controles onde se especifica os parâmetros do ensaio e os transdutores a serem monitorados. Na Figura 3. 13 apresenta-se uma janela onde pode-se observar o comportamento dos sinais, num gráfico xy, e os valores dos mesmos.

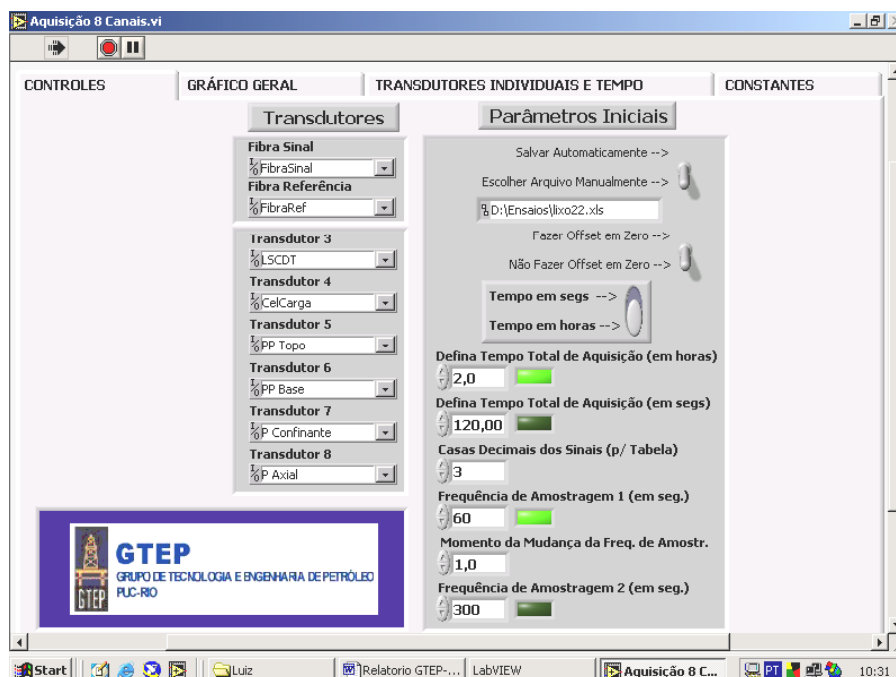


Figura 3. 12 – Painel frontal do programa (controles)

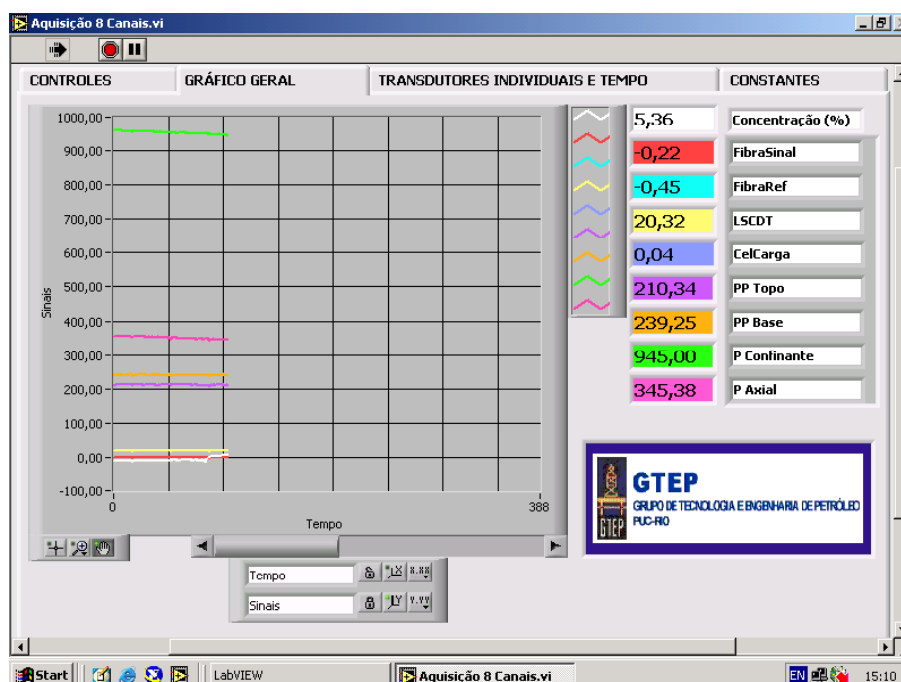


Figura 3. 13 – Painel frontal do programa (gráfico geral)

### 3.3. Metodologia de Ensaios

Poucas modificações foram realizadas em relação à metodologia original, mas todo procedimento será aqui apresentado novamente de forma a facilitar a leitura desta dissertação.

#### 3.3.1. Preparação do Sistema

A seguir são apresentados os procedimentos que antecedem a realização de qualquer ensaio. Para um bom andamento do mesmo também são sugeridas algumas recomendações importantes.

1. Inicialmente recomenda-se ligar os equipamentos: bomba “Waters”, GDS’s e o sistema de aquisição de dados 30 minutos antes da utilização dos mesmos;
2. É recomendado utilizar água deionizada deaerada como fluido da bomba “Waters” e, conseqüentemente, como fluido nos ensaios. Substituir e limpar o filtro de aço sinterizado do reservatório de água a cada novo ensaio. Com a troca do filtro, faz-se necessário purgar

(retirar o ar do circuito) a bomba antes de se iniciar qualquer tipo de ensaio, ou seja, este procedimento evita o surgimento de bolhas de ar na tubulação que liga o reservatório à bomba “Waters”. O surgimento destas bolhas seria prejudicial tanto para a bomba quanto para o ensaio.

3. De forma a verificar possíveis entupimentos e saturar as linhas do “cap” superior, circula-se o fluido a ser utilizado na fase de saturação pelas linhas (onde se aplica pressão no topo) aplicando-se na bomba “Waters” uma vazão de 1 a 3 ml/min.
4. É recomendado, como precaução, a realização de um ensaio em um corpo de prova de alumínio, a fim de se verificar possíveis vazamentos, testar os equipamentos e a instrumentação utilizada, além de ajustar a contrapressão a ser aplicada pela válvula de alívio.

A válvula de alívio possui uma mola interna que permite impor a contrapressão, bastando para isto ajustar a mola à pressão desejada para o ensaio. Para cada faixa de contrapressão desejada existe uma mola específica com uma rigidez adequada. No teste com o corpo de prova de alumínio, circula-se água pelo topo do mesmo e ajusta-se a mola até a contrapressão desejada para o ensaio, isto é feito através de um parafuso localizado na parte superior da válvula. Rosqueando o parafuso comprimi-se a mola e a pressão aumenta, desrosqueando o parafuso descomprimi-se a mola e a pressão diminui.

Na Figura 3. 14 e na Figura 3. 15 apresenta-se o circuito de aplicação de pressão no topo e pressão confinante com a numeração das válvulas e dos transdutores de pressão.

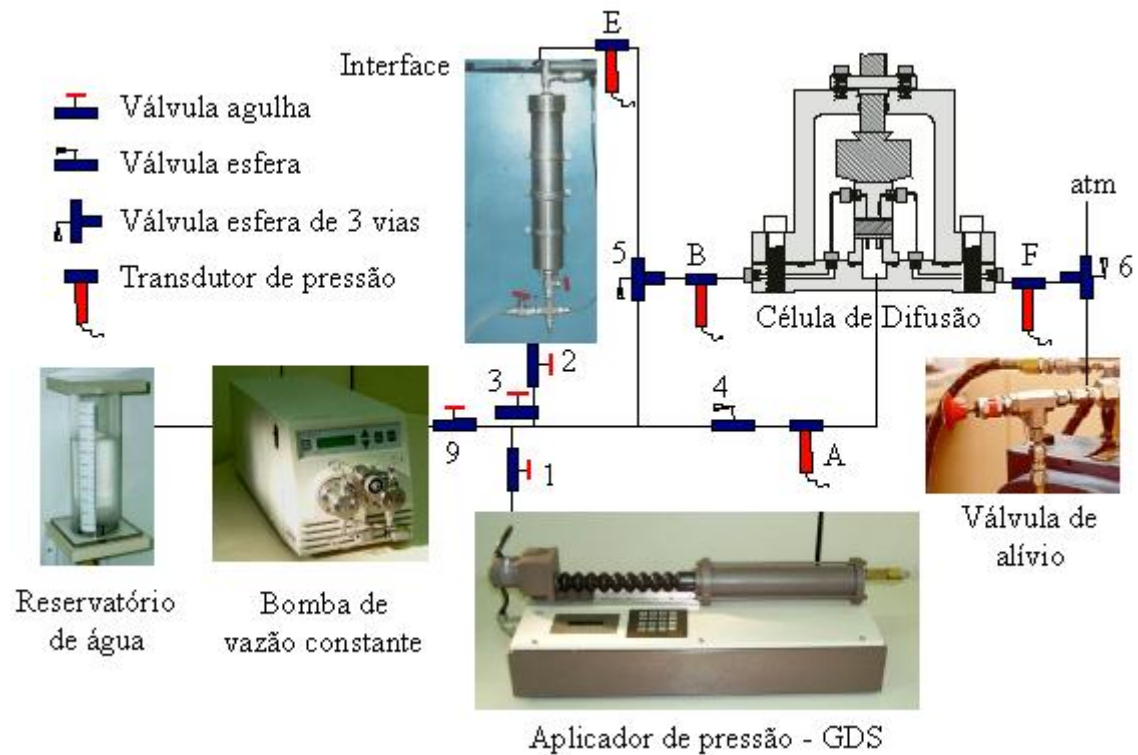


Figura 3. 14 – Circuito de aplicação de pressão no topo (Modificado de Muniz, 2003)

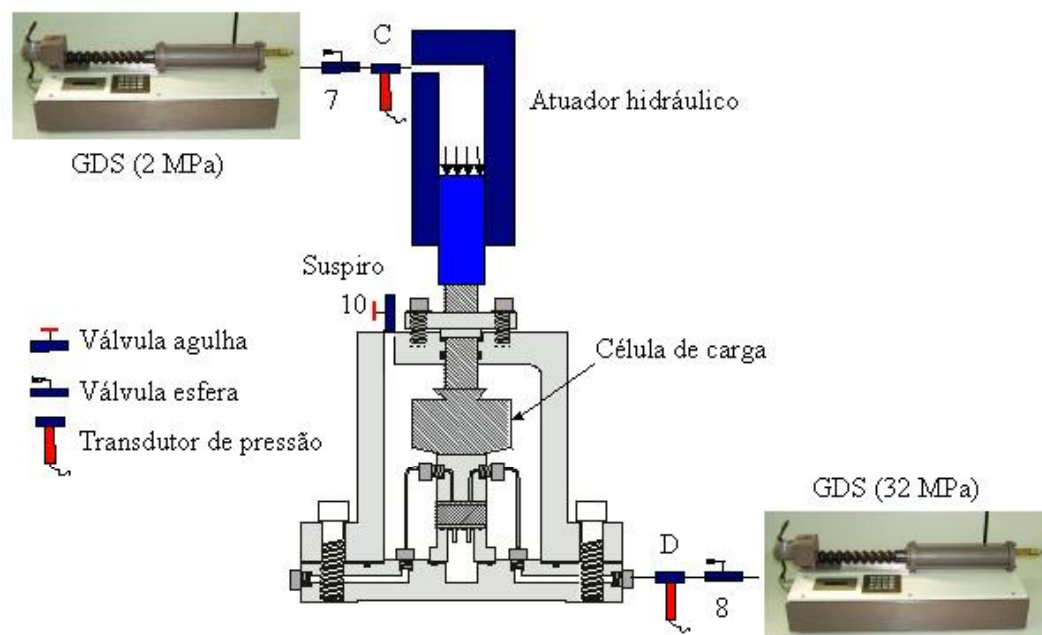


Figura 3. 15 – Circuito de pressão confinante e axial (Muniz, 2003)

### 3.3.2. Etapa de Montagem do Ensaio

Esta etapa é muito delicada e requer rapidez, pois uma prolongada exposição do folhelo ao ar pode ocasionar excessiva perda de saturação por evaporação. Então para se evitar este tipo de problema recomenda-se retirar o corpo de prova do óleo mineral onde é normalmente armazenado somente após todo o sistema estar devidamente preparado e testado. A seguir são apresentados os procedimentos sugeridos para esta etapa (Figura 3. 16).

1. Recortar previamente a membrana termoretrátil, a tela metálica e o geotêxtil (bidim) com diâmetro do corpo de prova que se deseja ensaiar 38,1 ou 50,8 mm (1,5” ou 2”). Realizar a saturação do geotêxtil (bidim) juntamente com o disco poroso de plástico (POROTEC com 1,5 mm de altura), com o fluido a ser utilizado na fase de saturação (água deionizada);
2. Aplicar a fita de autofusão em toda lateral dos “caps” cortando os excessos, a fim de prevenir vazamentos da pressão confinante para a contrapressão;
3. Colocar o cilindro de latão destinado a reduzir o volume de fluido no reservatório inferior, colocar o “o’ring” (menor) dentro da sua ranhura para que não ocorra vazamentos, em seguida sobre o “o’ring” colocar o “cap” da base com os fixadores (Figura 3.16 (a));
4. Utilizando a bomba “Waters”, injetar fluido à vazão de 1 a 2,5 ml/min no reservatório inferior abrindo-se as válvulas 9 e 4 até que o mesmo alcance o topo do “cap”, quando se deve então interromper o fluxo na bomba “Waters” e fechar a válvula 4. Em seguida, colocar o disco poroso de plástico já saturado sobre o “cap” da base;
5. Retirar o corpo de prova do recipiente onde estava armazenado em óleo mineral, secar cuidadosamente o excesso de óleo do corpo de prova com papel toalha de forma a não danificá-lo. Com o auxílio de um paquímetro, obter as dimensões (altura e diâmetro) e com uma balança de precisão pesar o corpo de prova. Em seguida colocá-lo sobre o disco poroso de plástico (Figura 3.16 (b)). Como já foi

- comentado anteriormente, este processo tem que ser feito rapidamente para não expor excessivamente o corpo de prova ao ar;
6. Colocar a tela metálica e o geotêxtil (bidim) sobre o corpo de prova (Figura 3.16 (c)), envolver o conjunto com a membrana termoretrátil (Figura 3.16 (d)), e em seguida colocar o “cap” superior sobre a tela metálica e o geotêxtil (bidim) conectando os engates rápidos à base da célula de difusão (Figura 3.16 (e));
  7. Utilizar em seguida o soprador térmico na potência máxima e aplicar calor na membrana termoretrátil para fazê-la aderir ao conjunto (Figura 3.16 (f)). Começar pelas bordas da membrana e posteriormente distribuir o calor igualmente em todo o conjunto. Recomenda-se aplicar por um período um pouco maior na base dos “caps” para que a membrana comprima a fita de autofusão garantindo uma boa vedação do conjunto;
  8. Cortar dois pedaços de arame flexível com comprimento suficiente para dar duas voltas nos “caps” e apertá-los ao redor destes de modo a comprimir ainda mais a membrana e a fita de autofusão, garantindo assim a estanqueidade do conjunto (Figura 3.16 (g));
  9. Colocar o “o’ring” (maior) da base, verificando se este está adequadamente dentro da sua ranhura. Posteriormente colocar a tampa da célula de difusão e fixá-la à base por meio dos parafusos de aço (Figura 3.16 (h));
  10. Conectar o macaco hidráulico à válvula 7 e aplicar pressão até que este se apoie na haste da célula de carga. Em seguida, fechar a válvula 7;
  11. Conectar o macaco hidráulico à válvula 8 e, com o suspiro da célula de difusão aberto (válvula 10), encher a câmara com o óleo confinante bombeando aproximadamente 45 vezes a alavanca. Este óleo encontra-se armazenado no reservatório da bomba hidráulica. Fechar o suspiro e aplicar uma pressão confinante (em torno de 300 kPa);
  12. Ligar a bomba “Waters” a uma vazão de 1 a 2,5 ml/min, abrir a válvula 5 no sentido do fluido de saturação (para baixo) e a válvula 6 (válvula de alívio) para a atmosfera, a fim de promover a circulação



de fluido pelas linhas de aplicação de pressão no topo (linhas do “cap” superior). Este procedimento tem como objetivo eliminar o ar que possa estar presente nas linhas resultando em uma total saturação do sistema;

13. Para finalizar esta etapa, fechar as válvulas 5, 6 e 8.

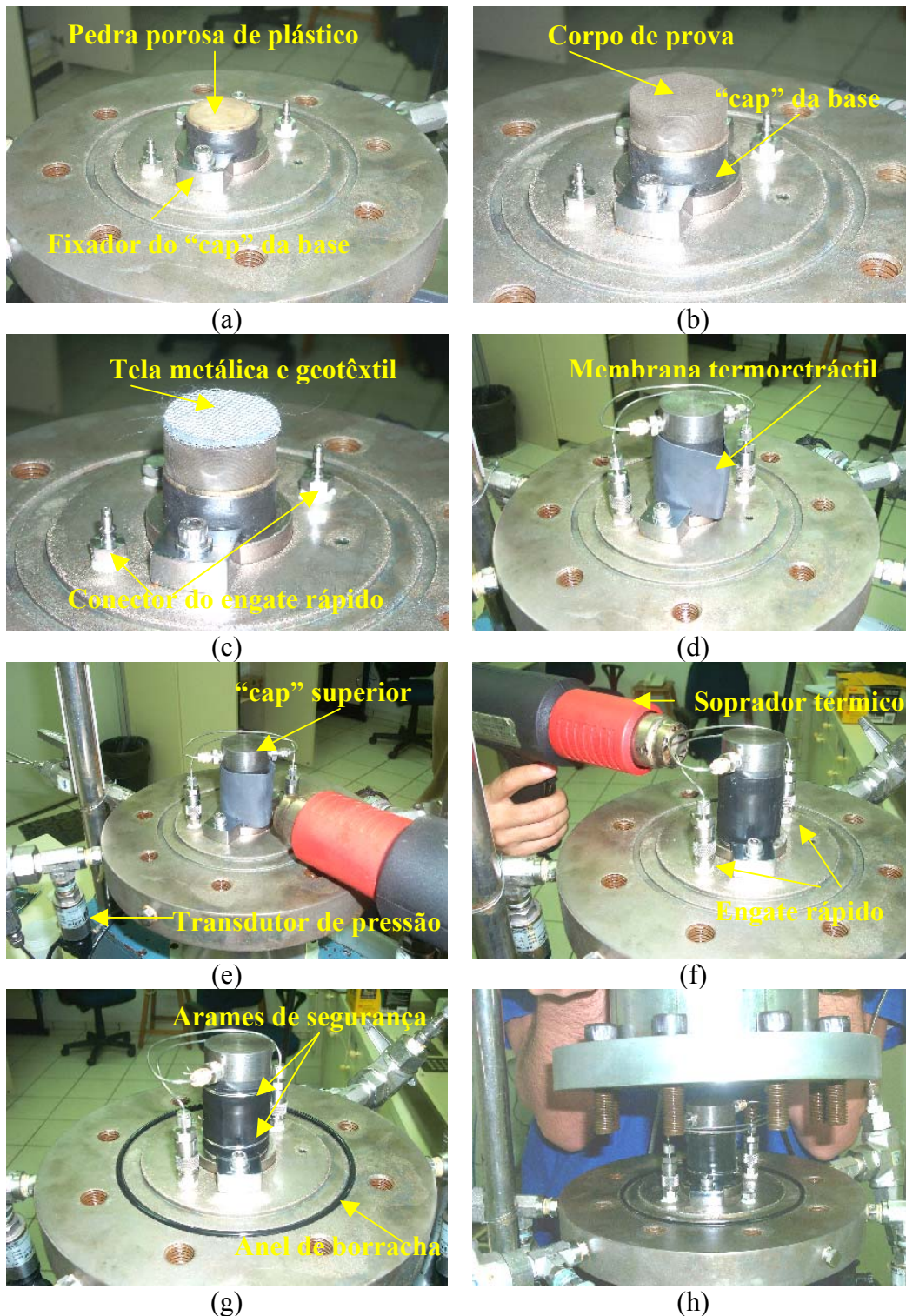


Figura 3. 16 – Etapa de montagem do ensaio



**3.3.3.****Etapas de Saturação do Corpo de Prova**

A saturação consiste em se preencher todos os vazios do corpo de prova por água, removendo-se ou dissolvendo-se o ar que ainda se encontre dentro dos vazios ou na linha de aplicação de pressão no topo. O tempo necessário para a saturação depende do tipo de material, do tamanho do corpo de prova, assim como do grau de saturação inicial. O processo de saturação por confinamento consiste em aumentar a pressão confinante em estágios sob condição não-drenada e medir as variações de poropressão. Nesta técnica pode ser necessária uma pressão confinante muito elevada para se atingir a saturação do corpo de prova, gerando assim, grande deformação no mesmo. Por isso, o processo de saturação por contrapressão é por vezes mais indicado. Neste processo a aplicação de contrapressão é acompanhada por igual acréscimo de pressão confinante de forma que a pressão efetiva seja constante, reduzindo a deformação do corpo de prova.

Para a verificação do grau de saturação do corpo de prova, utiliza-se o parâmetro  $B$  de Skempton (1954) dado pela Equação 3.1. Monitora-se o acréscimo de poropressão devido ao aumento da pressão de confinamento sob condições não drenadas. O valor deste parâmetro para rochas (neste caso o folhelho), dificilmente é igual a 1, como poderá ser visto mais adiante nos ensaios.

$$B = \frac{\Delta u}{\Delta \sigma_{conf}} \quad (3.1)$$

Onde;

$\Delta u$  = variação da poropressão;

$\Delta \sigma_{conf}$  = variação da pressão confinante.

O procedimento para a saturação do corpo de prova descrito a seguir é válido para a configuração atual do sistema em ensaios com carregamento isotrópicos, ou seja, sem aplicação de força axial. É provável que em ensaios com outro material os intervalos de tempo utilizados para cada estágio de variação da pressão confinante sejam diferentes, ficando o controle destes à critério da sensibilidade do pesquisador encarregado do ensaio. As Figuras 3.14 e 3.15 podem ser usadas como referência para os procedimentos experimentais apresentados a seguir.

1. Desconectar o macaco hidráulico da válvula 8, substituindo-o pelo GDS (32 MPa), aplicar 500 kPa de pressão confinante, e em seguida abrir a válvula 8 mantendo as válvulas 4, 5 e 6 fechadas;
2. Após um período de aproximadamente 15 minutos, fazer a leitura da pressão confinante e das pressões nos reservatórios de topo e base para estimativa do parâmetro B;
3. Fechar a válvula 9 e abrir a válvula 1, aplicando por meio do GDS (2 MPa) 400 kPa de contrapressão, em seguida abrir as válvulas 4 e 5, deixando que a contrapressão atue no topo e base do corpo de prova por um período de aproximadamente 90 minutos;
4. Fechar as linhas de drenagem (válvulas 4 e 5) e após 5 minutos fazer as leituras da pressão confinante e da pressão no topo e base do corpo de prova;
5. Aplicar um aumento de 500 kPa na pressão confinante e após 10 minutos fazer as leituras de pressão confinante e da pressão no topo e base, determinando novamente o valor do parâmetro B. O final da etapa de saturação ocorre quando o valor deste parâmetro não varia após dois estágios de confinamento e contrapressão consecutivos ou, no caso deste trabalho, o GDS atinja o seu limite máximo de pressão. Caso o parâmetro não atinja a estabilização neste estágio, aplicar um aumento de 500 kPa na contrapressão, abrindo novamente as válvulas 4 e 5 por mais 90 minutos;
6. Repetir os passos 4, 5 e 6 mais 2 vezes até que se tenha 2.000 kPa de pressão confinante e 1.900 kPa de contrapressão. Isto porque o GDS utilizado para aplicação de contrapressão possui capacidade máxima de 2.000 kPa e, como os incrementos sugeridos são de 500 kPa, somente mais 2 etapas podem ser executadas com aplicação de contrapressão;
7. Neste ponto, fechar as linhas de drenagem (válvulas 4 e 5), aguardar 5 minutos e então fazer as leituras da pressão confinante e pressão no topo e base;
8. Aplicar um aumento de 500 kPa na pressão confinante e após 25 minutos fazer as leituras de pressão confinante e pressão no topo e base determinando novamente o valor do parâmetro B. Caso este

valor ainda não esteja constante, realizar mais um estágio de confinamento, desta vez, sem aplicação de contrapressão;

9. Após 30 minutos, fazer as leituras de pressão confinante e pressão no topo e base, determinando novamente o valor do parâmetro B. Inicia-se então a fase de consolidação. Se for de interesse do pesquisador em realizar ensaios a maiores níveis de pressão, basta continuar aplicando incrementos de 500 kPa de pressão confinante com o GDS (32 MPa), e fazer as leituras de pressão confinante e pressão no topo e base após 25 min determinando o valor do parâmetro B, até que se alcance o nível de pressão proposto para o ensaio em questão, tendo como limite a capacidade máxima de 32 MPa do GDS. Posteriormente, segue-se com a fase de consolidação.

#### **3.3.4. Etapa de Consolidação do Corpo de Prova**

Esta etapa é realizada de forma a garantir que o excesso de poropressão gerado quando se impõe o carregamento ao corpo de prova seja dissipado e não se tenha gradiente de poropressão no mesmo. Esta etapa se prolonga até que 95 % do excesso de poropressão sejam dissipados ou não existam mais deformações no corpo de prova. Os ensaios neste trabalho foram realizados com carregamento isotrópico, ou seja, sem aplicação de força desviadora. Desta forma, perdeu-se a medida de deformação axial que anteriormente era realizada por um LSCDT fixo à haste da célula de carga. Esta medida de deformação era utilizada como critério para encerrar a consolidação do corpo de prova.

Na tentativa de se medir a redução da poropressão com o tempo decidiu-se modificar a metodologia original que utilizava drenagem pelo topo e base do corpo de prova, realizando-se a drenagem somente pelo topo do mesmo e monitorando a redução de pressão pelo transdutor da base. Infelizmente, após a realização de um ensaio teste no folhelho CP14 para avaliar a aplicação desta nova metodologia, verificou-se que o período necessário para a equalização das pressões de topo e base seria muito longo, superior a três dias para o folhelho

testado, tornando-se inviável tal modificação. Tendo em vista o resultado obtido, decidiu-se voltar à metodologia anterior com drenagem pelas duas extremidades.

Os procedimentos propostos para se executar a consolidação com a válvula de drenagem aberta para o sistema de aplicação de pressão no topo consistem das seguintes etapas:

1. Aplicar no GDS (32 MPa) a pressão confinante desejada para o ensaio, com a linha de aplicação de pressão no topo fechada (válvulas 4, 5 e 6);
2. Aplicar 400 kPa de contrapressão no GDS (2 MPa) e abrir as válvulas 4 e 5, permitindo a consolidação do corpo de prova. A contrapressão aplicada visa evitar que o ar dissolvido durante a saturação volte a se formar, e também garantir uma maior rigidez do sistema antes da etapa de difusão de pressão;
3. Recomenda-se realizar esta etapa por um período que garanta a estabilização das deformações. Muniz (2003), entretanto, nos ensaios realizados em folhelhos das mesmas formações que os utilizados nesta dissertação, sugere que a etapa de consolidação pode ser encerrada após um período de aproximadamente 18 horas, visto que após este período as deformações já se estabilizaram.

### **3.3.5.**

#### **Etapas de Difusão de Pressão do Corpo de Prova**

Com término da etapa de consolidação, ou seja, quando as poropressões e deformações do corpo de prova se estabilizam, dá-se início à etapa de difusão de pressão. Esta etapa tem como objetivo estimar o coeficiente de permeabilidade do corpo de prova, e consiste em aumentar a contrapressão no reservatório de topo e monitorar o aumento da pressão no reservatório de base. Isto acontece da seguinte maneira: ao aplicar-se uma pressão muito maior no reservatório de topo do corpo de prova, o reservatório de base, com a pressão menor, tende a se equalizar com o reservatório de topo. O reservatório superior (topo do corpo de prova), apresentando uma pressão maior, força o reservatório inferior (base do corpo de prova) a gradativamente aumentar sua pressão, pois a água sob pressão começa a

migrar do topo para a base. O tempo necessário para que a pressão na base atinja o valor da pressão do topo depende da permeabilidade e da compressibilidade do corpo de prova. Ensaando-se um material muito permeável, a equalização da pressão vai ser rápida, pois a transmissão da pressão é facilitada. Ensaando-se um material muito pouco permeável, o tempo de equalização é por sua vez muito maior. Nesta etapa são adotados os seguintes procedimentos:

1. Fechar as válvulas 1, 4 e 5, que estarão abertas ao final da etapa de consolidação e em seguida, abrir a válvula 9;
2. Ligar a bomba “Waters” a uma vazão de 0,5 ml/min (utilizar o mesmo fluido da etapa de saturação) e aguardar até que a pressão registrada no visor da mesma atinja 400 kPa, quando se deve então abrir as válvulas 5 e 6, sendo esta última aberta no sentido da válvula de alívio previamente calibrada para o valor de contrapressão desejado;
3. Monitorar a pressão no reservatório inferior (base) ao longo do ensaio pelo transdutor de pressão A;
4. Finalizar a etapa quando a pressão na base do corpo de prova se igualar à pressão no topo do mesmo.

Com base na curva de crescimento de pressão da base pode-se estimar o coeficiente de permeabilidade através do programa FPORO<sup>®</sup> especialmente desenvolvido para este fim (Frydman & Fontoura, 1999). O programa FPORO<sup>®</sup> desenvolvido baseia-se no método dos elementos finitos e considera as equações básicas de fluxo de água e íons devido a gradientes hidráulicos e químicos. As equações de transporte são obtidas adicionando-se os componentes que representam o transporte de água e íons, chegando a uma formulação que acopla os efeitos químicos, hidráulicos e mecânicos. Informações mais detalhadas sobre o programa, podem ser obtidas em Frydman & Fontoura (2001), Garcia (2003), Pastor (2001) e Araújo (2002).

Para execução da análise são necessários apenas os valores do módulo de elasticidade (E) e do coeficiente de Poisson ( $\nu$ ) do material em questão.

### 3.3.6.

#### **Etapas de Difusão de Íons do Corpo de Prova**

Quando as poropressões nos reservatórios da base e do topo do corpo de prova se igualam, dá-se início à fase de difusão de íons. Mantêm-se as pressões nos reservatórios e substitui-se o fluido do reservatório superior pelo fluido de interesse para o ensaio. Quando se introduz um gradiente químico, mantendo-se o gradiente hidráulico constante, provoca-se o surgimento de um fluxo osmótico que fará com que a água do reservatório inferior (baixa concentração) se transporte para o reservatório superior (alta concentração), reduzindo a pressão no reservatório inferior. Esta variação de pressão no reservatório inferior pode ser monitorada pelo transdutor de pressão A (Figura 3.14). Devido ao gradiente químico imposto, o fenômeno de difusão de íons também será observado no transporte dos íons do reservatório superior para o inferior, resultando num aumento da concentração no reservatório inferior ao longo do ensaio.

Para início desta etapa, substitui-se o fluido do reservatório superior (água ou fluido real de perfuração) pela solução desejada para o ensaio, a qual se encontra devidamente armazenada na interface que deve ser previamente pressurizada de forma a evitar queda na contrapressão aplicada. A seguir são apresentados os procedimentos para pressurização da interface e início da fase de difusão de íons, partindo-se do princípio de que a interface já se encontra devidamente preenchida com o fluido de interesse para o ensaio.

1. Anotar a pressão registrada no visor da bomba “Waters”;
2. Conservando a vazão da bomba constante, fechar na seqüência as válvulas 6 e 5 e abrir a válvula 2 para iniciar a pressurização da interface;
3. Quando a pressão lida no visor da bomba retornar ao valor inicial (passo1), abrir a válvula 5 no sentido da interface, permitindo que a solução adotada para o ensaio chegue ao topo do corpo de prova e, em seguida abrir a válvula 6 para a válvula de alívio;
4. Encerrar esta etapa quando a diferença entre a pressão na base e a pressão no topo se mantiver constante.

Ao final do ensaio coleta-se com uma seringa 5 ml do fluido presente no reservatório inferior que então será submetido a uma análise química, a fim de se



quantificar os cátions e ânions presentes no mesmo. Esta análise destina-se a avaliar quimicamente as possíveis reações entre o fluido utilizado e o folhelho.

Os resultados obtidos nessa etapa permitem estimar, por meio do programa FPORO<sup>®</sup>, o coeficiente de difusão de íons, o coeficiente de reflexão e a tortuosidade. São adotados como parâmetros de entrada de dados, valores que permitam a reprodução das curvas experimentais obtidas. A metodologia utilizada para a realização das análises feitas no FPORO<sup>®</sup> foi a mesma utilizada por Muniz (2003).

Visando a determinação dos índices físicos, o corpo de prova é retirado da célula de difusão tendo suas dimensões e peso determinados, sendo em seguida fragmentado e colocado em cápsulas para obtenção da umidade final.

#### **3.3.6.1.**

##### **Colocação e Reposição de Fluido na Interface Tipo Pistão**

Quando se realiza o ensaio com água deionizada, a circulação de fluido e a pressurização do sistema ficam a cargo da bomba de vazão constante (“Waters”) e da válvula de alívio, dispensando a utilização da interface tipo pistão. Para a utilização de outros fluidos, tanto na etapa de difusão de pressão ou de íons, é imprescindível o uso da interface tipo pistão.

Para introdução de um fluido, diferente da água, na célula de difusão utiliza-se os procedimentos descritos a seguir, considerando-se o fim da consolidação e o início da difusão de pressão.

1. Fechar as válvulas 1, 4 e 5, que estarão abertas ao final da etapa de consolidação e em seguida, abrir a válvula 9;
2. Abrir a tampa superior da interface e em seguida abrir a válvula 2 localizada na parte inferior da mesma;
3. Adicionar o fluido real de perfuração, previamente preparado e deaerado e em seguida fechar a tampa superior da interface com a ajuda da chave adequada;
4. Ligar a bomba “Waters” a uma vazão de 0,5 ml/min a 4,5 ml/min com a finalidade de pressurizar a interface, evitando-se queda na

contrapressão aplicada e acompanhar o aumento da pressão até que a leitura no transdutor E seja de 400 kPa;

5. Abrir a válvula 5 (topo) para cima, ou seja, para a direção da linha que comunica a interface ao sistema, e em seguida abrir a válvula 6 para a direção da válvula de alívio, que deverá estar previamente calibrada para 400 kPa;
6. Circular o fluido no sistema, a fim de que este substitua a água presente nas linhas e no dreno do topo do corpo de prova. A circulação é feita até que se note a chegada do fluido (sem misturas) no recipiente de coleta. A avaliação da chegada de fluido no recipiente é feita visualmente, necessitando-se de um pouco de sensibilidade por parte do pesquisador;
7. Garantida a presença do fluido em contato com o topo do corpo de prova, regular a válvula 6 (válvula de alívio) para o nível de contrapressão desejado para o ensaio.

A interface tipo pistão tem capacidade máxima para armazenar 1 litro de fluido. Se o ensaio for realizado a uma vazão de 0,5 ml/min, conclui-se que após 2000 min ou 33 horas será necessário repor fluido nesta interface. Para isso realizam-se os seguintes passos:

1. Fechar as válvulas 6 e 5, e em seguida a bomba “Waters”;
2. Retirar a pressão da interface, por meio da válvula 3, verificando o valor da pressão por meio do transdutor E, e em seguida retirar a tampa superior da interface utilizando a chave adequada;
3. Neste momento o êmbolo interno, presente no interior da interface, estará no ponto mais alto. Então, com ajuda de um bastão, empurra-se este até o limite da parte inferior, e em seguida recoloca-se o fluido desejado na interface;
4. Recolocar a tampa superior da interface utilizando a chave adequada e em seguida ligar a bomba “Waters” a uma vazão de 0,5 ml/min a 4,5 ml/min, a fim de realizar a pressurização da interface para o nível de contrapressão desejado no topo do corpo de prova;
5. Somente abrir a válvula 5 quando verificar no transdutor E a mesma pressão verificada nos transdutores B e F. Abrir a válvula 6 para a

direção da válvula de alívio que estará calibrada para o nível de contrapressão desejado no topo do corpo de prova.

### **3.4. Conclusão**

Neste Capítulo apresentou-se detalhadamente a metodologia de ensaios, o equipamento utilizado e as novas feições adicionadas ao mesmo. Em função das modificações realizadas, alguns ajustes na metodologia se fizeram necessários, e se mostraram adequados à configuração atualmente utilizada e aqui apresentada.

Os novos “caps” superiores e a nova interface tipo pistão permitem a realização de ensaios com fluidos mais viscosos e a maiores níveis de pressão. Estas modificações juntamente com o novo sistema de aquisição de dados dão ao equipamento maior versatilidade e melhor condição de monitoramento dos instrumentos de medição.