

3.

Equipamentos, Materiais e Metodologia de Ensaio

3.1.

Equipamentos

Nesta seção são descritos os equipamentos utilizados neste trabalho e os detalhes de montagem dos mesmos.

3.1.1.

Célula triaxial cúbica verdadeira

Uma célula triaxial cúbica verdadeira com a possibilidade de medida de permeabilidade foi colocada em operação neste trabalho, para estudar a variação da permeabilidade de rochas produtoras de petróleo.

Todas as atividades experimentais foram realizadas no Laboratório de Mecânica das Rochas do CENPES (Petrobras). Vale ressaltar que o equipamento apresentado ainda não se encontra em sua versão final, restando ainda, serem adaptados sistemas de medidas de deformação volumétrica do corpo de prova e de permeabilidade na direção vertical, sistemas estes que já vêm sendo elaborados.

O equipamento é chamado de verdadeiro como forma de distingui-lo dos equipamentos triaxiais convencionais, muitas vezes chamados apenas de triaxial.

Nos equipamentos triaxiais convencionais, duas das três tensões principais aplicadas em corpos de prova são sempre iguais entre si. Podendo-se assim, no máximo, ser alcançado um estado de tensão axisimétrico (por exemplo, $\sigma_1 \neq \sigma_2 = \sigma_3$).

Já com o equipamento apresentado neste trabalho é possível aplicar três tensões principais diferentes e independentes em um corpo de prova e com isso, alcançar um estado de tensão anisotrópico ($\sigma_1 \neq \sigma_2 \neq \sigma_3$). Vale ressaltar que um estado de tensão anisotrópico é o mais comumente encontrado *in situ*. Desta

maneira, o novo equipamento permite condições de tensão mais realistas e, conseqüentemente, mais confiabilidade dos resultados obtidos.

A figura 3.1 mostra uma vista em perspectiva do conjunto geral da célula triaxial cúbica e a figura 3.2 mostra o corpo da célula.



Figura 3.1 – Foto do conjunto geral da célula triaxial cúbica, vista em perspectiva

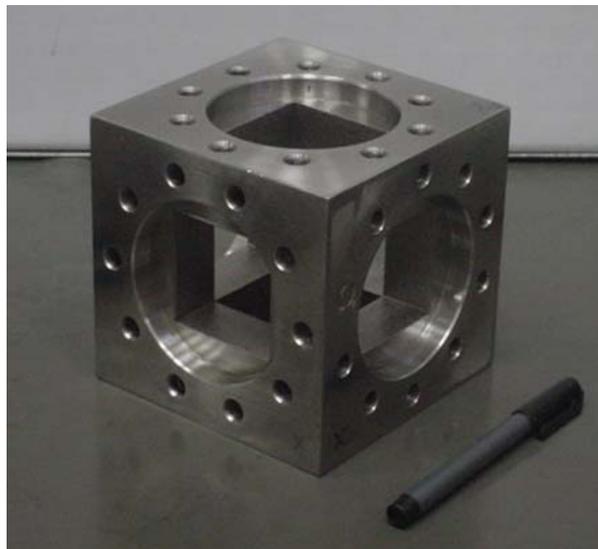


Figura 3.2 – Foto do corpo da célula triaxial cúbica

A figura 3.3 mostra as tampas lisa (à esquerda) e para fluxo (à direita). As tampas lisas do equipamento são utilizadas na direção vertical do mesmo. Nesta direção não há fluxo, não havendo, portanto, um orifício central para a passagem do tubo para fluxo. Por outro lado, as tampas para fluxo apresentam este orifício central, por onde passam os tubos para fluxo. Ainda na figura 3.3, podem ser

vistos os orifícios, tanto na tampa lisa quanto na tampa para fluxo, um pouco acima da região central. Os tubos para aplicação da tensão são conectados através destes orifícios.

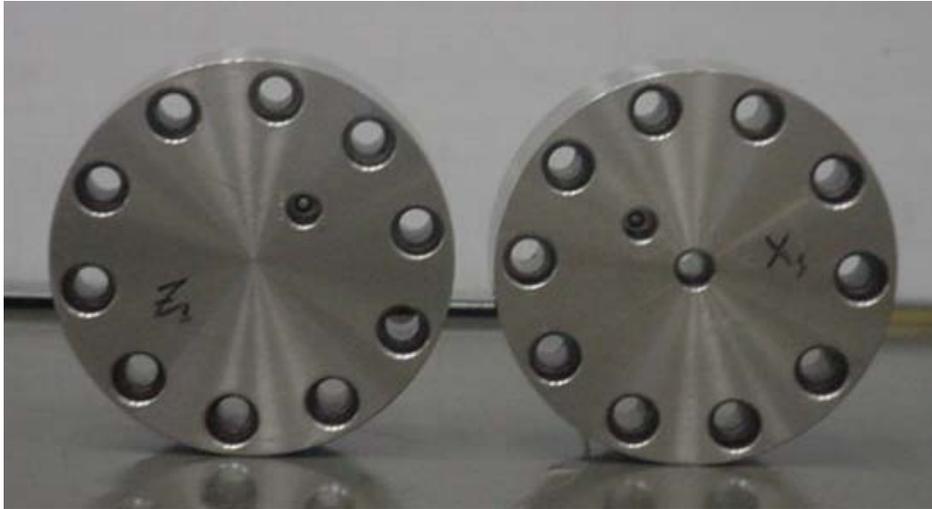


Figura 3.3 – Foto das tampas lisa (à esquerda) e para fluxo (à direita)

Associadas às tampas lisas estão as membranas lisas e às tampas para fluxo estão as membranas para fluxo. Na parte superior da figura 3.4 estão mostradas as membranas para fluxo utilizadas na célula triaxial, com os tubos para fluxo. Já na parte inferior da mesma figura estão mostradas as membranas lisas.

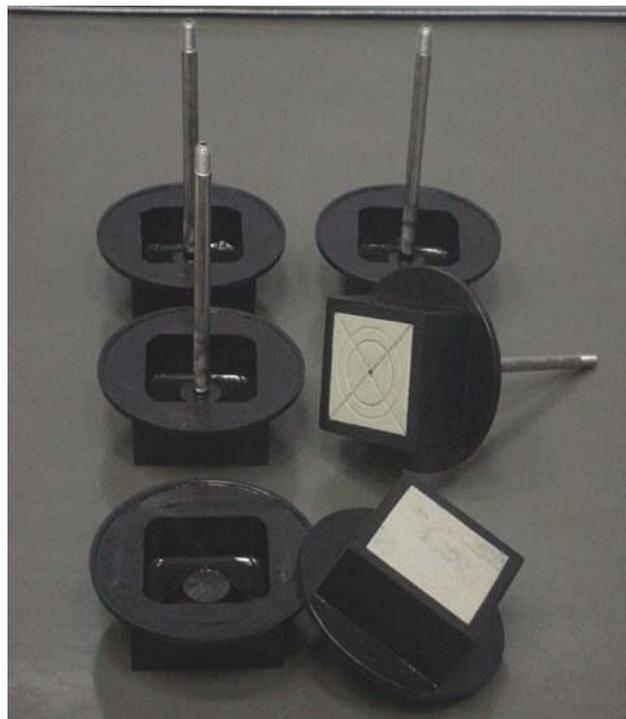


Figura 3.4 – Foto das membranas lisa e para fluxo

Ainda na figura 3.4, podem ser vistas as faces das membranas lisa e para fluxo. As membranas para fluxo apresentam um difusor de fluido em suas faces. Já as membranas lisas, uma tampa cega, pois na direção onde estas são utilizadas não há fluxo.

As membranas utilizadas são fabricadas em borracha nitrílica e, tanto o difusor de fluido quanto a tampa cega são fabricados em polipropileno. O material utilizado na fabricação do corpo da célula e das tampas (lisas e para fluxo) é o aço inoxidável.

A aplicação das tensões principais, de forma independente, se faz possível através das três linhas espirais de tensão, mostradas na figura 3.5.



Figura 3.5 – Foto da célula triaxial cúbica montada, com as três linhas espirais de tensão

As medidas de permeabilidade, com o equipamento triaxial cúbico apresentado, tornam-se possíveis, injetando fluido pelo tubo, destacado na figura 3.6 por uma seta azul. Esta figura apresenta uma foto da vista superior da configuração de ensaio utilizada.

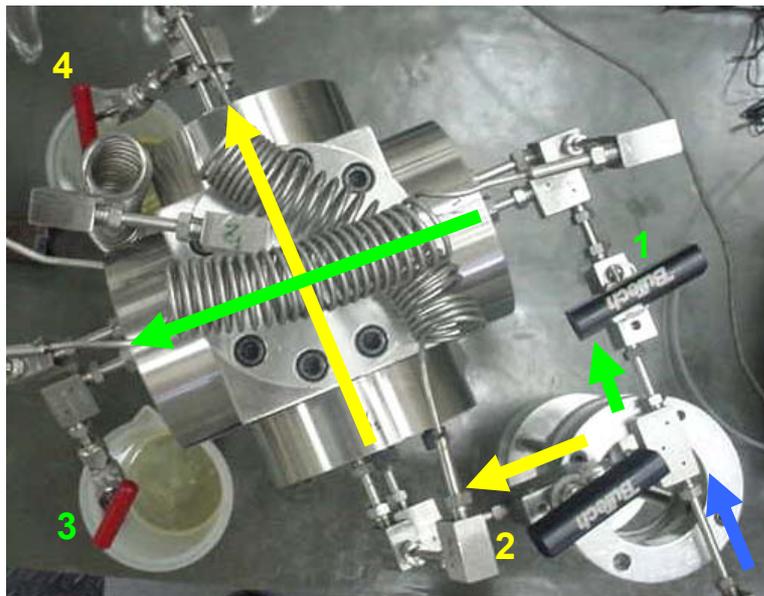


Figura 3.6 – Foto da vista superior da configuração de ensaio utilizada

A medida da permeabilidade pode ser realizada nas duas direções horizontais perpendiculares entre si. Para isto, é necessário abrir ou fechar as válvulas 1 e 3 ou 2 e 4, indicadas na figura 3.6. Ainda na mesma figura, estão destacadas, por setas verde e amarela, as trajetórias de fluxo que podem ser seguidas pelo fluido injetado. Estas trajetórias dependem da abertura ou fechamento das válvulas já citadas.

O fluido é injetado em uma das faces do corpo de prova e percola por este até a sua face oposta. Esta trajetória é seguida, pois à face oposta do corpo de prova está associado um tubo aberto à pressão atmosférica. A diferença de pressão entre as faces é que condiciona o fluxo.

A poro-pressão gerada durante a percolação do fluido entre as faces opostas do corpo de prova é registrada por um transdutor de pressão. Com o valor da poro-pressão, assim como o valor da vazão sob a qual o fluido foi injetado e ainda alguns dados referentes ao corpo de prova e ao fluido utilizado para fluxo, a permeabilidade da rocha ensaiada pode ser calculada, como será mostrado na seção 3.3.

Durante o desenvolvimento do equipamento, mais especificamente das membranas, houve uma preocupação a respeito da rigidez das membranas. Estas devem apresentar uma rigidez ótima. Com flexibilidade excessiva, os problemas de efeito de extremidade são verificados, com as membranas das faces perpendiculares adjacentes entrando em contato umas com as outras. Desta forma,

não se faria possível a aplicação de tensões diferenciais, pois estas tenderiam a se igualar com o contato. Já com as membranas apresentando rigidez excessiva, as tensões aplicadas por algum instrumento de aplicação de carga, de fato, não atingem o corpo de prova, pois parte da carga fica retida na membrana rígida.

Por meio de tentativas, chegou-se a uma membrana de rigidez desconhecida, que não apresentava problemas de efeito de extremidade. Como forma de verificar se a membrana apresentava rigidez ótima, foram feitos ensaios de compressão biaxial, utilizando corpo de prova cúbico de alumínio, instrumentado com *strain gages* em duas faces opostas (figura 3.7) e um sistema de leitura de deformação, determinada pelos mesmos (figura 3.8). Na figura 3.9 pode ser visto, em detalhe, o corpo de prova instrumentado, dentro da célula triaxial, sendo submetido à compressão biaxial.

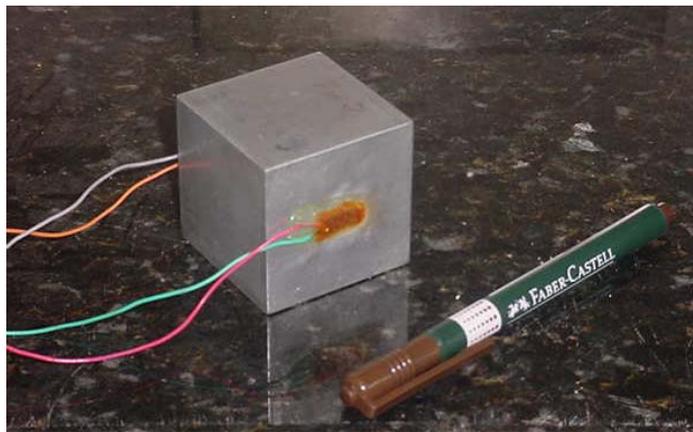


Figura 3.7 – Foto do corpo de prova cúbico de alumínio utilizado nos ensaios de verificação de rigidez das membranas



Figura 3.8 – Foto do sistema de leitura de deformação de *strain gages*

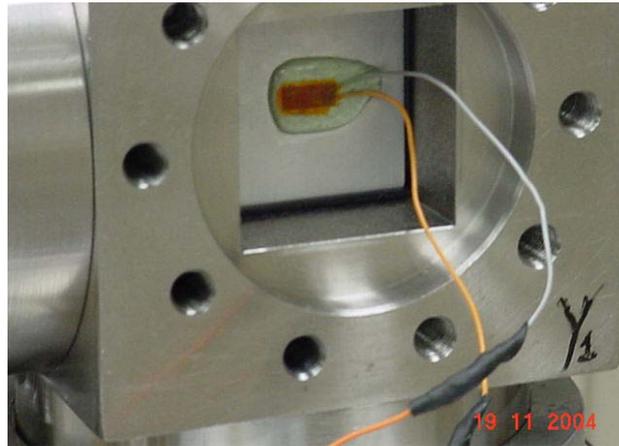


Figura 3.9 – Foto do corpo de prova cúbico de alumínio, instrumentado com *strain gages*, para os ensaios de verificação de rigidez das membranas

Desta forma, foram aplicados valores pré-estabelecidos de tensão. Através do sistema de leitura dos *strain gages*, foi medida a deformação sofrida pelo corpo de prova de alumínio. Com o módulo de Young do corpo de prova ($E = 70 \text{ GPa}$) e com as deformações sofridas pelo mesmo, através da lei de Hooke, foi determinada a tensão que de fato havia sido transmitida pelas membranas ao corpo de prova.

As primeiras membranas ensaiadas apresentaram rigidez excessiva, transmitindo ao corpo de prova apenas cerca de 30% da tensão aplicada. Gradativamente foi sendo reduzida a rigidez das membranas, até que foram obtidas membranas com rigidez ótima, as quais transmitiam ao corpo de prova aproximadamente 100% da carga aplicada.

As tabelas 3.1 e 3.2 mostram os valores de tensão aplicados e de deformação medidos no corpo de prova de alumínio com as membranas lisa e para fluxo, adotadas como de rigidez ótima.

Tabela 3.1 – Valores de tensão e deformação da verificação da rigidez das membranas lisas (direção vertical)

Membranas lisas (direção vertical)

| Leitura do Strain Gage | | | | | |
|------------------------|---|---|---------------------------------------|---------------------|-------------------------|
| Tensão aplicada (MPa) | Deformação strain gage 1 ($\times 10^{-6}$) | Deformação strain gage 2 ($\times 10^{-6}$) | Deformação média ($\times 10^{-6}$) | Tensão medida (MPa) | % de tensão transmitida |
| 6,9 | 96 | 97 | 96,5 | 6,8 | 98% |
| 13,7 | 192 | 194 | 193,0 | 13,5 | 98% |
| 20,6 | 294 | 294 | 294,0 | 20,6 | 100% |
| 27,5 | 390 | 389 | 389,5 | 27,3 | 99% |
| 34,4 | 491 | 490 | 490,5 | 34,3 | 100% |
| 41,2 | 589 | 592 | 590,5 | 41,3 | 100% |

Tabela 3.2 – Valores de tensão e deformação da verificação da rigidez das membranas para fluxo (direções horizontais)

Membranas para fluxo (direções horizontais)

| Leitura do Strain Gage | | | | | |
|------------------------|---|---|---------------------------------------|---------------------|-------------------------|
| Tensão aplicada (MPa) | Deformação strain gage 1 ($\times 10^{-6}$) | Deformação strain gage 2 ($\times 10^{-6}$) | Deformação média ($\times 10^{-6}$) | Tensão medida (MPa) | % de tensão transmitida |
| 6,9 | 98 | 96 | 97,0 | 6,8 | 99% |
| 13,7 | 193 | 193 | 193,0 | 13,5 | 98% |
| 20,6 | 293 | 294 | 293,5 | 20,5 | 100% |
| 27,5 | 392 | 390 | 391,0 | 27,4 | 100% |
| 34,4 | 487 | 489 | 488,0 | 34,2 | 99% |
| 41,2 | 593 | 590 | 591,5 | 41,4 | 100% |

A figura 3.10 ilustra uma visão geral da montagem dos ensaios de compressão biaxial, realizados para verificação da rigidez das membranas.



Figura 3.10 – Foto da montagem dos ensaios de compressão biaxial, realizados para verificação da rigidez das membranas

3.1.2.

Intensificadores de pressão

As tensões principais foram aplicadas aos corpos de prova durante os ensaios, através de intensificadores de pressão hidráulicos servo-controlados. Estes intensificadores fazem parte dos sistemas de testes geomecânicos (STG) MTS 815 e MTS 816 do Laboratório de Mecânica das Rochas do CENPES (Petrobras). Na figura 3.11 pode ser visto um destes intensificadores de pressão.



Figura 3.11 – Foto do intensificador de pressão hidráulico servo-controlado

Para a aplicação das tensões de forma independente, três intensificadores de pressão foram utilizados. Um para cada uma das tensões principais. Dois destes intensificadores são do STG MTS 815 e o outro do MTS 816. A capacidade máxima de aplicação de tensão de cada um dos intensificadores é de 12000 psi, cerca de 80 MPa.

3.1.3.

Bomba de fluxo

Foi utilizada, para medida de permeabilidade dos corpos de prova, uma bomba de fluxo de vazão constante, Waters 510, como pode ser vista na figura 3.12. Esta bomba tem capacidade máxima de pressão de 6000 psi, cerca de 40 MPa, e pode injetar fluido sob vazão máxima de 9,9 cm³/min.

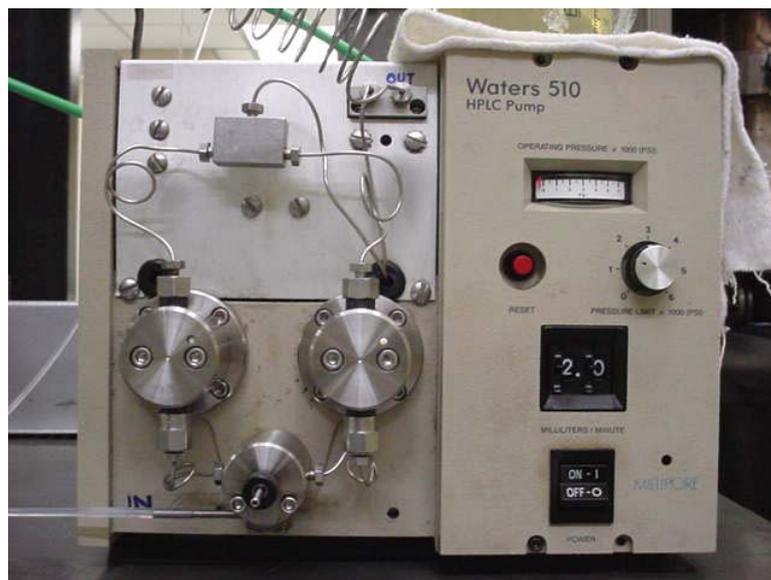


Figura 3.12 – Foto da bomba de fluxo de vazão constante, Waters 510

3.1.4.

Transdutor de pressão

Ao fazer percolar pelo corpo de prova, um fluido sob vazão constante, uma poro-pressão é gerada, refletindo a dificuldade com que este fluido percola pelo corpo de prova. Esta poro-pressão gerada durante o fluxo é registrada pelo transdutor de pressão Validyne, destacado na figura 3.13 por um círculo vermelho.

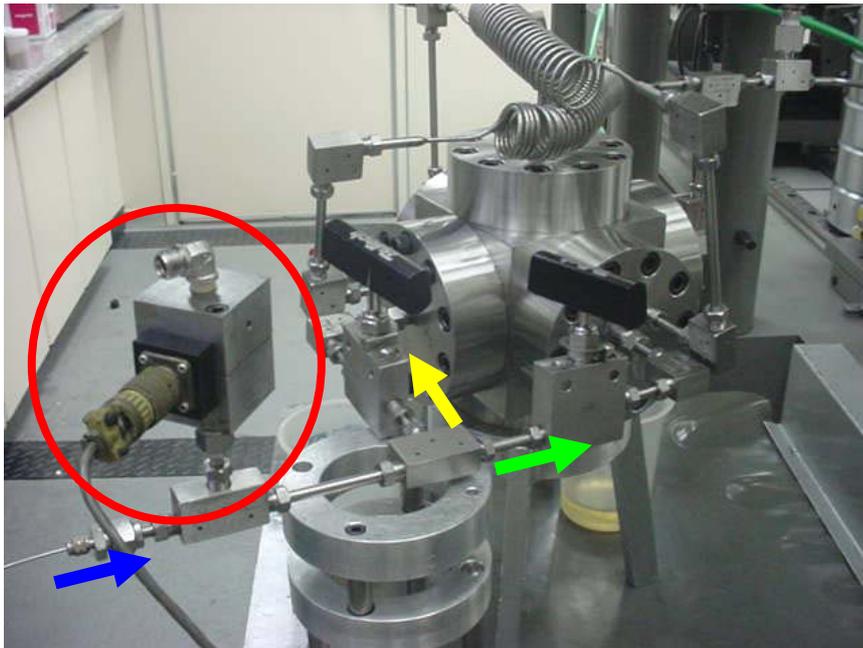


Figura 3.13 – Foto destacando o transdutor de pressão Validyne

Este transdutor de pressão é conectado a uma caixa de leitura de transdutor Validyne (figura 3.14), que converte o sinal registrado pelo transdutor de pressão em sinal digital. Desta forma, pode ser lido pela *display* da caixa de leitura, de forma indireta, o valor da poro-pressão gerada durante o fluxo.



Figura 3.14 – Foto da caixa de leitura de transdutor Validyne

Dentro de cada transdutor de pressão existe um diafragma. As fotos A e B da figura 3.15 mostram o transdutor de pressão aberto e o diafragma mencionado. Existem diafragmas com capacidade de registrar pressões que variam de 0,08 até 3200 psi (0,00055 até 22 MPa).

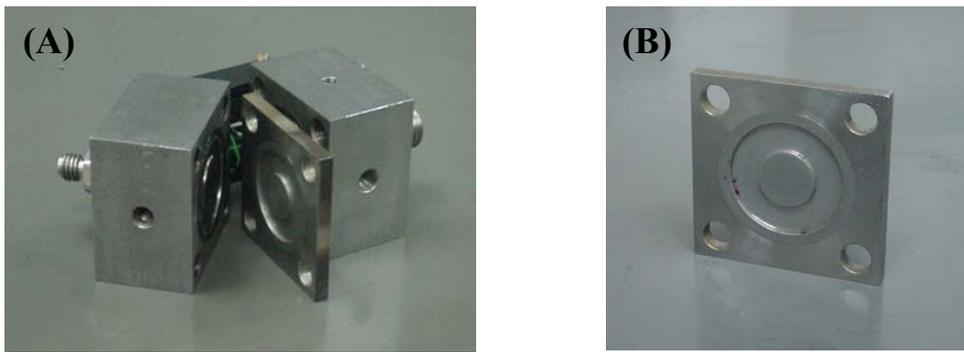


Figura 3.15 – Fotos: (A) do transdutor de pressão aberto e do diafragma; (B) do diafragma

O valor lido no *display* da caixa de leitura é um percentual do valor da capacidade do diafragma, que estiver sendo utilizado no transdutor de pressão.

O diafragma utilizado no transdutor de pressão, durante os ensaios deste trabalho, foi de 125 psi (0,86 MPa). Desta maneira, estando registrado no *display* da caixa de leitura, o número 20, isto significa que o valor da poro-pressão registrado é 20% de 125 psi, ou seja, 25 psi (0,17 MPa).

3.2.

Materiais

Nos ensaios executados durante este trabalho foram utilizados corpos de prova cúbicos de 50 mm de três diferentes formações de arenitos (Berea, Rio Bonito e Botucatú). Em se tratando de rochas sedimentares, tamanho de grãos e poros, bem como a presença ou não de cimentação e a natureza do cimento fazem com que as propriedades mecânicas e hidráulicas de diferentes arenitos apresentem resultados bem variados.

Os processos de formação destas rochas podem dar uma explicação para esta variabilidade de resultados. Em geral, estas são formadas por conjunto de fenômenos naturais, começando pelo intemperismo físico e químico da rocha matriz. Este sedimento formado é então transportado por vários agentes, como vento, água e gravidade, e são depositados em áreas mais rebaixadas do relevo. Durante o transporte, as partículas sofrem desgaste por abrasão, em intensidades variáveis, dependendo da energia do meio transportador e, têm por consequência,

mudanças no tamanho e geometria dos grãos, além de alterações químicas dos sedimentos. O ambiente de deposição e suas alterações físico-químicas afetarão a compactação e a cimentação dos sedimentos, alterando assim, propriedades como porosidade, permeabilidade e resistência do material.

A porosidade aparente dos corpos de prova foi determinada segundo o método sugerido pela ISRM (Brown, 1981). Neste trabalho, a porosidade aparente será citada sempre apenas como porosidade.

Várias medidas de dimensões dos corpos de prova foram obtidas por meio de um paquímetro. Com estas foi calculado o volume total V do corpo de prova. Os corpos de prova foram saturados a vácuo com óleo OB-9, cuja massa específica ρ_o é de $0,86 \text{ g/cm}^3$. Com isso, obteve-se a massa saturada M_{sat} . A massa seca M_{seca} foi obtida, deixando os corpos de prova secarem em estufa sob aproximadamente 100°C e, em seguida, resfriarem em um dessecador por 30 minutos. Por fim, a porosidade n foi calculada através da equação 3.1,

$$n = \frac{\left(\frac{M_{sat} - M_{seca}}{\rho_o} \right)}{V} \times 100\% \quad (3.1)$$

A seguir serão descritos os arenitos Berea, Rio Bonito e Botucatú, utilizados neste trabalho para estudo da variação da permeabilidade sob variação do estado de tensão, utilizando a célula triaxial cúbica verdadeira, descrita acima.

3.2.1.

Arenito Berea

Este arenito vem principalmente da região centro-norte de Ohio, nas vizinhanças de Berea, próximo a Cleveland. O arenito faz parte da seqüência sedimentar Bedford-Berea, que se estende da Pennsylvania a Kentucky, e é de idade Mississippiana. Na pedreira, este arenito encontra-se com camadas espessas, mostrando freqüentemente estruturas sedimentares, como estratificações cruzadas e *ripples* de correntes (UWM, 19__?).

Existem várias formações de onde são extraídos arenitos em Ohio, mas nenhum é tão conhecido como o arenito Berea. Esta rocha, de cor cinza clara, uniformemente acamada, apresenta uma porosidade moderada e não é muito dura (Ries, 1912). O Berea é tido como um material extremamente homogêneo.

A visão tradicionalmente aceita é de que o arenito Berea foi depositado nos distritos de Ashland e Medina, em canais fluviais que corriam para o sul. Perfurações mais recentes nesta região mostraram que estes canais arenosos não são contínuos, são constituídos por corpos de areia isolados e encontram-se saturados com petróleo. O arenito tem uma composição quartzosa com grãos de tamanho médio a fino, empacotamento frouxo, cimentado, com intercalações de folhelho abaixo do Berea capeador (Hillebrand e Coogan, 1984). No distrito de Ashland e Medina, os poços completados no Berea são geralmente produtores de óleo.

A figura 3.16 mostra a foto de um corpo de prova do arenito Berea, utilizado neste trabalho. Vale ressaltar que na escala do corpo de prova, não pôde ser visto nenhum sinal que indicasse a direção da deposição dos grãos.

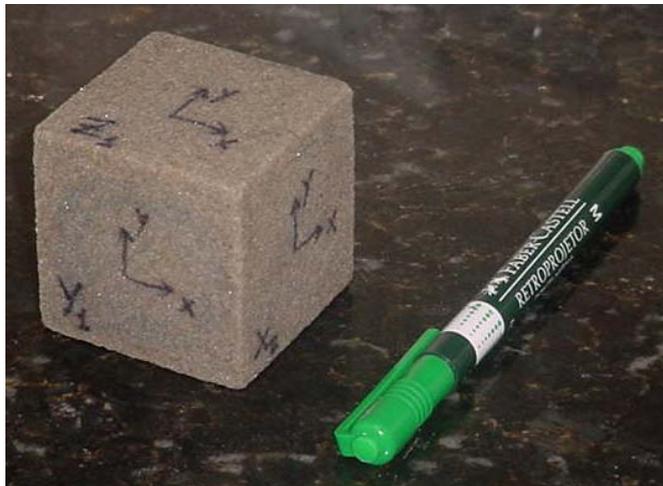


Figura 3.16 - Foto de um corpo de prova do arenito Berea

3.2.2.

Arenito Rio Bonito

Os corpos de prova do arenito Rio Bonito ensaiados neste trabalho são provenientes da Bacia do Paraná. Esta é uma extensa bacia intracratônica,

desenvolvida sobre crosta continental, preenchida por rochas sedimentares e vulcânicas, que possui uma área maior que 1.400.000 km². A porção situada no Brasil, cerca de 1.100.000 km², distribui-se pelos estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina, Paraná, São Paulo, Minas Gerais, Mato Grosso do Sul, Mato Grosso e Goiás. Outras porções são encontradas no Paraguai (100.000 km²), Argentina (100.000 km²) e norte do Uruguai (100.000 km²) (Quintas *et al.*, 1999). Esta bacia possui um formato alongado, na direção NNE-SSW, com cerca de 1.750 km de comprimento e largura média de 900 km, sendo caracterizada por uma sedimentação paleozóica-mesozóica. A espessura máxima do empilhamento gira em torno de 8000 metros, sendo grande parte dela recoberta por derrames de lavas essencialmente basálticas. Esta bacia é produto de uma complexa conjugação de processos tectono-sedimentares, atuantes durante o Fanerozóico.

A Formação Rio Bonito, depositada sobre a Formação Rio do Sul, é constituída, segundo Schneider *et al.* (1974), por uma porção basal arenosa, uma porção mediana predominantemente argilosa e uma superior, predominantemente arenosa, que se caracteriza por conter os principais leitos e camadas de carvão. Os mesmos autores realizaram uma revisão estratigráfica da Bacia do Paraná e subdividiram a Formação Rio Bonito em três membros: Triunfo, Paraguaçu e Siderópolis.

O Membro Triunfo, que constitui a porção basal da referida formação, possui sedimentos arenosos com abundante estratificação cruzada, cor esbranquiçada, granulometria fina à média, localmente grosseiras, regularmente selecionados, com grãos subarredondados. Intercalam siltitos e folhelhos de coloração cinza-escuro. As características litológicas e sedimentares indicam ambiente fluvio-deltaico de sedimentação.

O Membro Paraguaçu é caracterizado por uma sedimentação predominantemente pelítica, constituída de intercalação rítmica de siltitos e folhelhos com intercalações de camadas de arenitos muito finos, quartzosos, micáceos, com laminação paralela e ondulada.

O Membro Siderópolis é caracterizado por camadas de arenitos fino a muito finos, de cor cinza escura, intercalados com argilitos e folhelhos carbonosos, localmente com camadas de carvão.

Os corpos de prova do arenito Rio Bonito ensaiados neste trabalho correspondem à descrição dos arenitos da porção basal desta formação (Membro

Triunfo). Em nenhum destes corpos de provas pôde ser identificado um sinal que indicasse a direção de deposição dos grãos. A figura 3.17 mostra a foto de um destes corpos de prova.

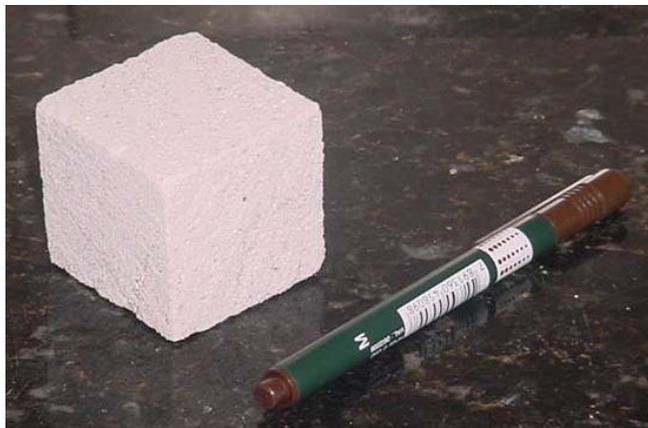


Figura 3.17 - Foto de um corpo de prova do arenito Rio Bonito

3.2.3.

Arenito Botucatú

Durante a Era Mesozóica, um acentuado fenômeno de desertificação tomou conta de toda a superfície correspondente à bacia do Paraná. Rochas da formação Botucatú são os registros dessa fase. Esta formação é litologicamente constituída por arenitos avermelhados de granulação média a grossa e superfície fosca. Grandes estratificações cruzadas evidenciam seu caráter eólico (Oliveira e Mühlmann, 1967).

A figura 3.18 mostra a foto de um corpo de prova do arenito Botucatú, utilizado neste trabalho. Através de análise táctil-visual, não puderam ser identificados sinais que indicassem a direção de deposição dos grãos. O mesmo foi observado para os arenitos Berea e Rio Bonito, já descritos.



Figura 3.18 - Foto de um corpo de prova do arenito Botucatu

3.3.

Metodologia de ensaio

Os ensaios realizados neste trabalho consistiram em fazer percolar por um corpo de prova cúbico de rocha um fluido de viscosidade conhecida e, enquanto isso, variar o estado de tensões atuante no mesmo. Este estado, por se tratar de um equipamento de ensaio triaxial cúbico verdadeiro, é alterado através da variação independente de cada uma das tensões principais. Este é um fator diferencial do trabalho apresentado, onde um estado de tensão verdadeiramente anisotrópico ($\sigma_1 \neq \sigma_2 \neq \sigma_3$) pôde ser aplicado em corpos de prova de rocha para estudo da variação da permeabilidade. Com o equipamento apresentado neste trabalho, a medida de permeabilidade pode ser obtida em duas direções horizontais perpendiculares entre si.

A variação da permeabilidade das rochas ensaiadas foi estudada sob diferentes estados de tensões (hidrostático e triaxial verdadeiro) e programas de ensaio. O primeiro ensaio executado foi um ensaio hidrostático com um corpo de prova de arenito Berea, com medição da permeabilidade nas duas direções horizontais perpendiculares entre si, a partir de agora, denominadas X e Y. Este foi realizado para validação do funcionamento do equipamento que estava sendo desenvolvido. Os resultados dos ensaios validaram o funcionamento do equipamento.

O segundo ensaio, também com medida da permeabilidade nas direções X e Y e, ainda com o arenito Berea, foi executado sob um programa diferente. Neste

ensaio, a variação das permeabilidades horizontais foi observada, seguindo trajetórias de tensões estabelecidas por invariantes do tensor de tensões: o primeiro invariante do tensor de tensões I_1 e o segundo invariante das tensões desviadoras J_{2D} . O primeiro mede o efeito da componente hidrostática do tensor e o segundo a componente desviadora do tensor de tensões. A permeabilidade foi observada em função da variação do segundo invariante das tensões desviadoras J_{2D} , sob um mesmo valor do primeiro invariante do tensor de tensões I_1 . Desta forma, neste ensaio pôde ser verificado o efeito isolado da tensão desviadora na variação da permeabilidade da rocha, visto que a tensão média atuante se manteve constante. Outra vez os resultados foram válidos. As expressões dos invariantes de tensões citados são:

$$I_1 = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z \quad (3.3)$$

$$J_{2D} = \frac{1}{6} \left[(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_x - \sigma_z)^2 \right] \quad (3.4)$$

com σ sendo a tensão aplicada e os índices x , y e z representando as direções da aplicação das tensões. Convencionou-se, neste trabalho, x e y como direções horizontais (perpendiculares entre si) e z como direção vertical. Estas direções são referentes à posição dos corpos de prova no equipamento, não à orientação *in situ* dos mesmos.

Os cinco ensaios seguintes continuaram com medida da permeabilidade nas direções X e Y, mas outros arenitos foram ensaiados e também sob outro programa de ensaio. Dois destes ensaios foram com o arenito Rio Bonito e os outros três com o arenito Botucatu. Em cada corpo de prova ensaiado, sob o novo programa de ensaio, foram aplicados estados de tensão hidrostático e triaxial verdadeiro. Este último, sob a seguinte relação:

$$\begin{cases} \sigma_x = \text{tensão no eixo horizontal X} = 0,6 \sigma_z; \\ \sigma_y = \text{tensão no eixo horizontal Y} = 0,8 \sigma_z; \\ \sigma_z = \text{tensão no eixo vertical Z.} \end{cases}$$

Portanto, o estado de tensão triaxial verdadeiro, neste trabalho, será sempre representado da seguinte forma: 0,6: 0,8: 1,0 (tensão no eixo X: tensão no eixo Y: tensão no eixo Z).

Este novo programa de ensaio foi adotado para que pudesse ser feita uma comparação entre a variação da permeabilidade sob o estado de tensão hidrostático e triaxial verdadeiro.

Depois de realizados este total de sete ensaios, foi verificado um problema sistemático de excesso de perda de carga na tubulação entre a saída do transdutor de pressão e o tubo para fluxo da direção Y. Pode ser observado, no canto inferior direito da figura 3.19, uma tubulação em espiral, responsável pelo excesso de perda de carga citado. Ainda na mesma figura, na parte central, pode ser visto que na direção X, a trajetória percorrida pelo óleo de fluxo é diferente (menor e menos sinuosa).



Figura 3.19 – Foto indicando a trajetória percorrida pelo óleo de fluxo na direção X e na direção Y (com excessiva perda de carga)

Devido ao problema de excesso de perda de carga identificado, as medidas da permeabilidade na direção Y, dos sete ensaios realizados, foram descartadas. O problema foi solucionado, substituindo a tubulação em espiral por uma similar à utilizada na direção X.

Depois disso, por problemas de falta de tempo hábil, visto que este problema foi identificado no último mês do prazo para conclusão deste trabalho,

mais dois ensaios foram realizados. Estes dois ensaios, agora com medidas válidas da permeabilidade, tanto na direção X quanto na Y, foram executados sob o mesmo programa, utilizado na última série de ensaios descrita acima (com comparação dos resultados sob estado de tensão hidrostático e triaxial verdadeiro).

Os resultados destes dois últimos ensaios, assim como dos outros sete ensaios citados, estão apresentados e discutidos em detalhes no capítulo 4.

A tabela 3.3 apresenta um resumo dos programas de ensaio realizados neste trabalho, em cada um dos arenitos utilizados.

Tabela 3.3 – Resumo dos programas de ensaio realizados

| Ensaio | Arenito | Descrição do programa de ensaio |
|-----------------|------------|--|
| 1º | Berea | variação do estado de tensão de forma hidrostática |
| 2º | Berea | variação do estado de tensão triaxial verdadeiro, com J_{2D} variando sob o mesmo valor de I_1 |
| 3º, 4º e 5º | Rio Bonito | variação dos estados de tensão hidrostático e triaxial verdadeiro |
| 6º, 7º, 8º e 9º | Botucatú | |

Todos os corpos de provas utilizados neste trabalho, antes de serem ensaiados, foram saturados com o óleo OB-9, mesmo óleo utilizado para fluxo durante as medidas de permeabilidade.

O método de fluxo de estado permanente foi utilizado para as medidas de permeabilidade realizadas. A condição de saturação do corpo de prova é justificada pela necessidade de um estado de fluxo permanente que o método exige. Ao utilizar o método de estado permanente foi necessário que um fluxo constante de óleo fosse estabelecido entre as extremidades opostas do corpo de prova. Isto se deu com a bomba de fluxo Waters 510, mantendo a vazão de óleo injetada constante ($2 \text{ cm}^3/\text{min}$) e igual em ambas as extremidades do corpo de prova. Tendo isto, utilizando o transdutor de pressão já descrito, a poro-pressão gerada ao fazer percolar óleo pelo corpo de prova foi registrada e, finalmente, a permeabilidade pôde ser calculada.

A equação 3.3, originada da Lei de Darcy, foi utilizada para o cálculo da permeabilidade:

$$k = \frac{Q.L.\mu_o}{A.\Delta p} \quad (3.3)$$

com Q sendo a vazão sob a qual o óleo foi injetado; L , o comprimento da trajetória de fluxo (comprimento do corpo de prova); μ_o , a viscosidade do óleo; ΔP , a diferença de pressão entre as extremidades da trajetória de fluxo (faces opostas do corpo de prova); e A , a área da seção transversal do corpo de prova.

Como já mencionado, as medidas de permeabilidade neste trabalho foram realizadas através do método de fluxo de estado permanente, contudo, estas também podem ser efetuadas através do método de pulso transiente. Neste último, um pequeno e instantâneo aumento de poro-pressão é aplicado em uma das extremidades do corpo de prova e, depois disso, monitora-se a dissipação desta variação de pressão com o decorrer do tempo. A permeabilidade é então determinada pela relação *diminuição de pressão vs. tempo*. O tempo necessário para a diminuição da pressão varia de acordo com a permeabilidade da rocha, podendo levar muitas horas. O método de pulso transiente exige que a permeabilidade seja constante durante todo o tempo de medida. Para mais detalhes sobre ambos os métodos, ver, por exemplo, Kranz *et al.* (1990), Brace *et al.* (1968) e Walsh e Brace (1984).

Vale ressaltar que durante o fluxo de óleo pelo corpo de prova para a medida da permeabilidade, a face oposta à qual o óleo é injetado é aberta à pressão atmosférica. Desta maneira, para o cálculo da tensão efetiva atuante no corpo de prova, o valor da poro-pressão u foi obtido fazendo uma média entre os valores de pressão atuante nas extremidades opostas do corpo de prova. Na extremidade onde está sendo injetado o óleo, este valor é o registrado pelo transdutor de pressão, ΔP . Já na outra extremidade, este valor é igual a zero. Sendo assim, a poro-pressão utilizada para cálculo da tensão efetiva atuante no corpo de prova é igual a metade do valor de ΔP .

A influência da poro-pressão na tensão efetiva é controlada pelo coeficiente poroelástico α , conhecido como o coeficiente de Biot. Este foi experimentalmente

definido por Geerstma (1957) e Skempton (1960) e relaciona tensão e poro-pressão, como mostrado pela equação 3.4:

$$\sigma' = \sigma - \alpha u \quad (3.4)$$

onde σ' é a tensão efetiva; σ é a tensão total; α é o coeficiente poroelástico de Biot; e u é a poro-pressão. Normalmente, para cálculo da tensão efetiva, este coeficiente é adotado igual a 1 (um). Portanto, neste trabalho foi adotado $\alpha = 1$. Desta forma, a tensão efetiva foi calculada pela equação 3.5.

$$\sigma' = \sigma - u \quad (3.5)$$

Depois de escolhido o corpo de prova a ser ensaiado e deste ter sido posicionado dentro do corpo da célula triaxial cúbica, como mostra a figura 3.20, vêm as membranas, anéis de vedação, tampas (figura 3.21) e as linhas espirais de tensão (figura 3.22). Conectadas a estas linhas estão as mangueiras dos sistemas de testes geomecânicos MTS 815 e MTS 816, por onde são aplicadas as tensões no corpo de prova. Estas mangueiras estão mostradas em destaque na figura 3.23.

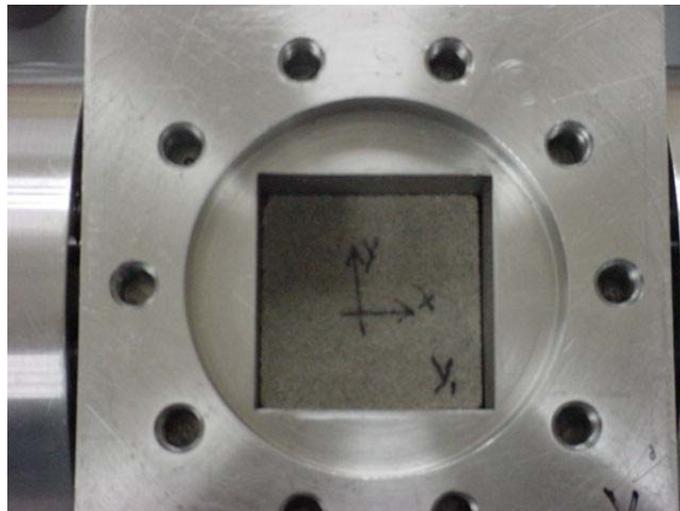


Figura 3.20 – Foto do corpo de prova dentro da célula parcialmente desmontada

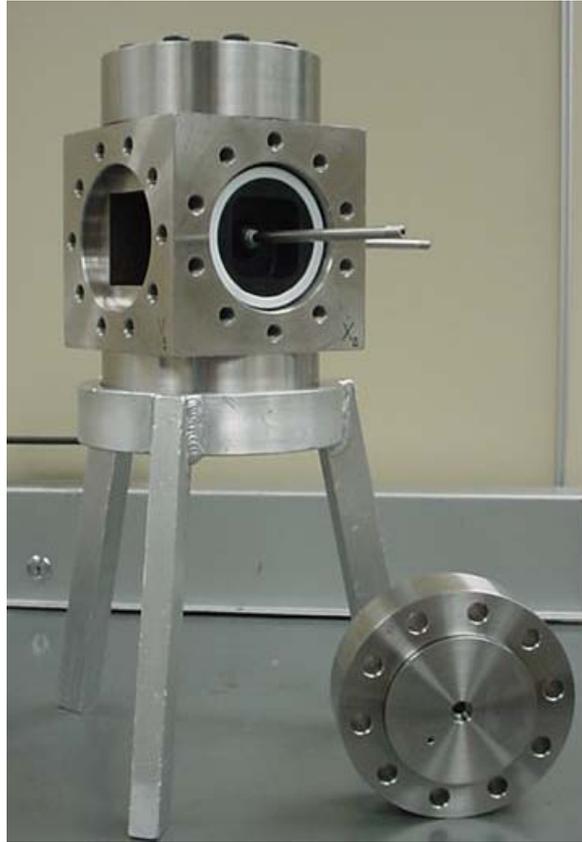


Figura 3.21 – Foto da célula triaxial parcialmente desmontada, com algumas membranas, tampas e anéis de vedação, já posicionados

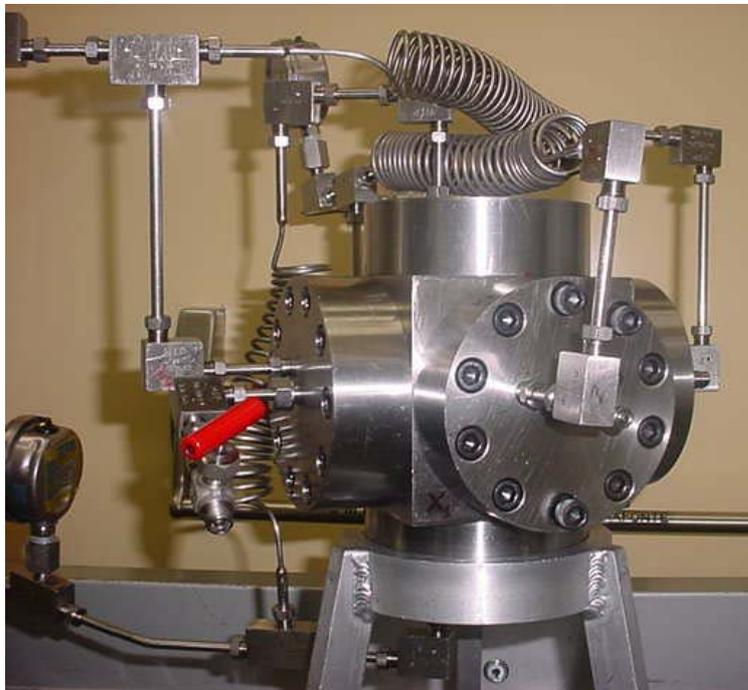


Figura 3.22 – Foto da célula montada, com as linhas espirais de tensão instaladas

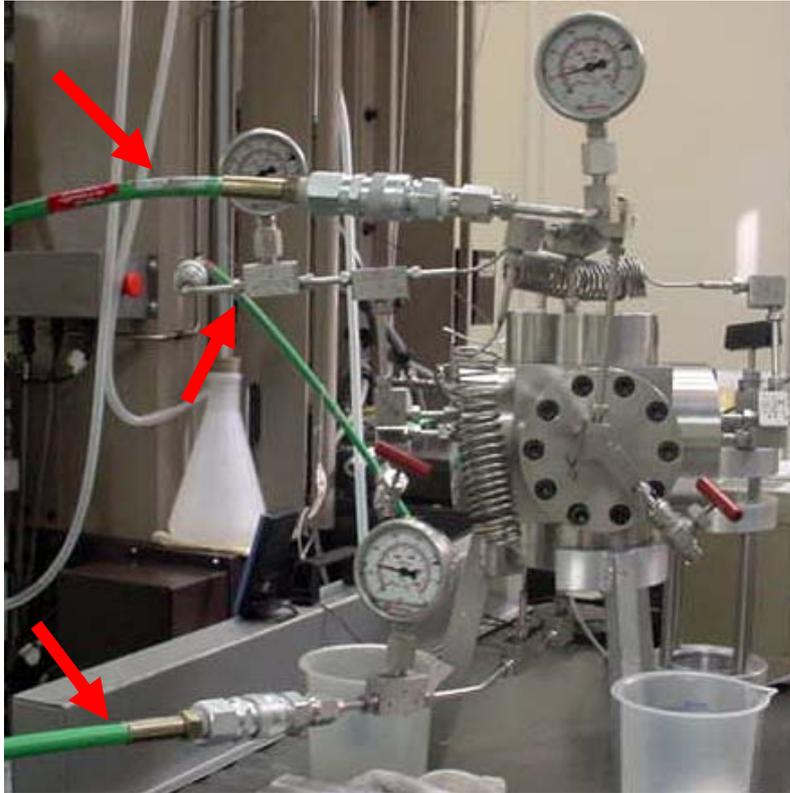


Figura 3.23 – Foto indicando as mangueiras dos sistemas de testes geomecânicos MTS 815 e MTS 816, por onde são aplicadas as tensões no corpo de prova

Para a realização das medidas de permeabilidade, são instalados a bomba para fluxo, as válvulas, que controlam a direção do fluxo, e o transdutor de pressão (figura 3.24).

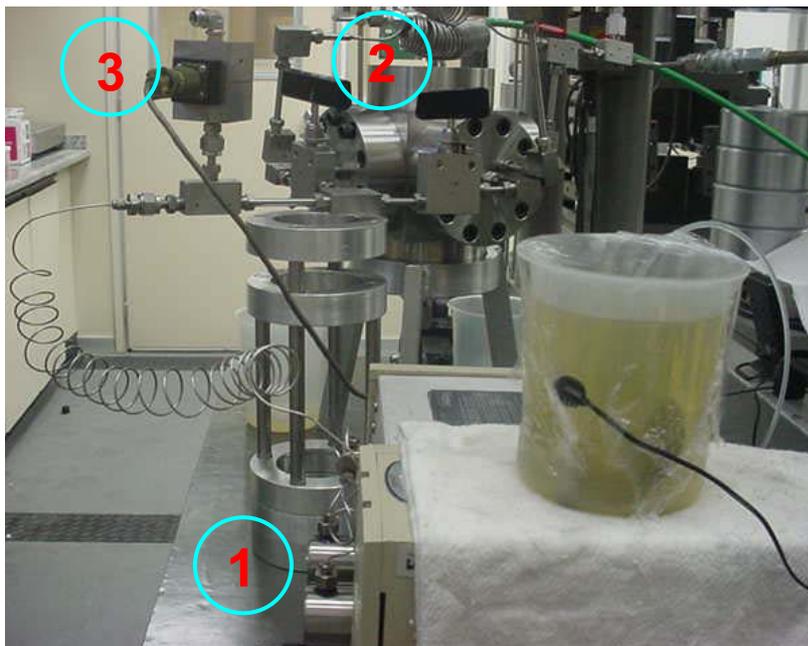


Figura 3.24 – Foto indicando (1) bomba para fluxo, (2) válvulas que controlam a direção do fluxo e (3) transdutor de pressão

Na parte inferior da figura 3.24 está mostrada a bomba, utilizada para fazer percolar fluido através do corpo de prova. Sobre a bomba pode ser visto um recipiente com fluido, que é o óleo OB-9, utilizado para as medidas de permeabilidade. Aderido a este recipiente, pode ser visto um sensor, que está marcando a temperatura do óleo. Houve esta preocupação de controle da temperatura do óleo durante os ensaios, pois a viscosidade do mesmo, que é parte da expressão utilizada para o cálculo da permeabilidade, é função da temperatura.

O transdutor de pressão, visto na figura 3.24, é ligado à caixa de leitura, que por sua vez, está conectada a um computador, que faz a aquisição automática dos dados de poro-pressão dos ensaios.

Por fim, a figura 3.25 mostra uma visão geral da montagem dos ensaios.

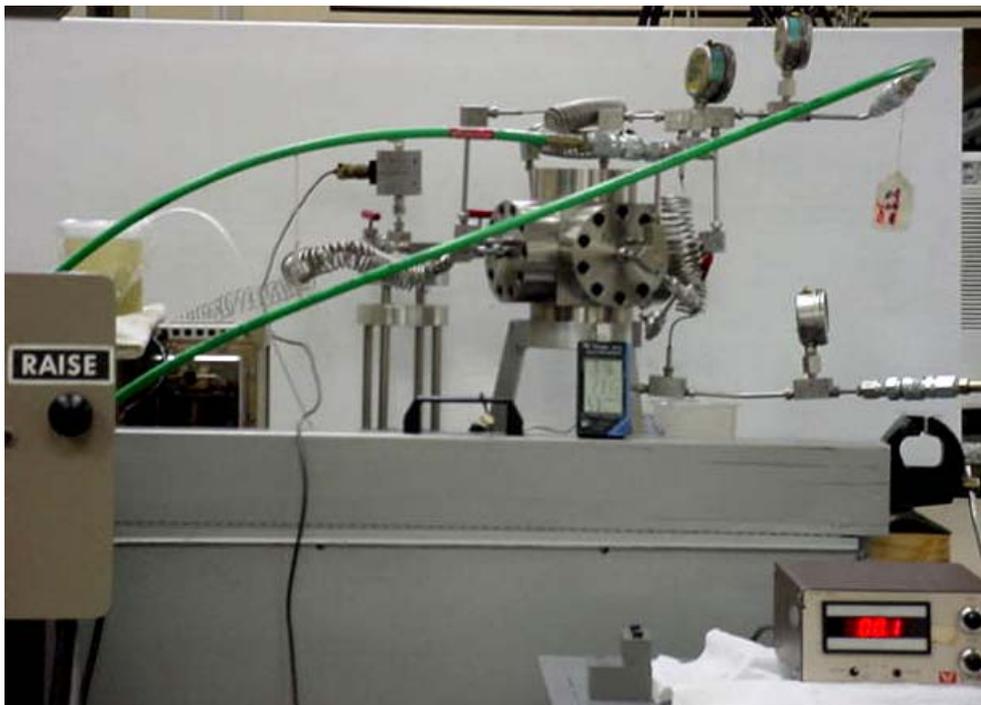


Figura 3.25 – Visão geral da montagem dos ensaios