

3

Programa Experimental

A metodologia para a caracterização dos arenitos e para as realizações dos ensaios será mostrada a seguir:

3.1

Caracterização dos Arenitos

Segundo Santos (2004) as rochas sedimentares, em geral, 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 é depositado 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 tem por consequência mudanças no tamanho e geometria dos grãos, além de alterações químicas dos sedimentos. O ambiente de deposição e suas alterações físico-químicas afetam a compactação e a cimentação dos sedimentos, alterando assim propriedades como porosidade, permeabilidade e resistência do material.

Tamanho de grãos e poros, bem como a presença ou não de cimentação e a natureza do cimento fazem com que a variabilidade dos resultados possa ser muito grande. A explicação está na própria formação das rochas sedimentares.

3.1.1

Arenito Sergi

O arenito Sergi constitui a formação de reservatórios importantes da Bacia do Recôncavo. A Bacia do Recôncavo está localizada no Estado da Bahia, ocupando aproximadamente 10.000km² e uma profundidade de até 9.500m. É classificada como rift abortado segundo a classificação de Klemme (1980, *apud* Figueiredo & Gabaglia, 1986), ou tipo III segundo Szatmari & Porto (1982 *apud* Figueiredo & Gabaglia, 1986).

Sendo um rift alongado na direção NE-SW preenchido por sedimentos de idade juro-cretáceo, e constituído por um semi-gráben com camadas mergulhando para SE. A seção geológica NW-SE da Bacia do Recôncavo é limitada a leste pelo alto de Salvador e a oeste pelos altos Canabrava, Boa União e Aporá, e ao sul pelo falhamento da Barra.

Nessa bacia a Formação Sergi é constituída essencialmente por quartzoarenitos com granulometria variada, incluindo-se conglomerados finos e lamitos, e cuja forma é semelhante a um “lençol” com espessamento para SE. Entretanto, segundo descrições de De Ros (1987) realizadas no Campo de Sesmaria, a formação apresenta a forma de cunha, cuja espessura diminui para SE e quase ou totalmente desaparece em poços devido ao grande número de falhas da região. Ou seja, possui a forma geral descrita primeiramente, mas as alterações causadas pelo tectonismo foram intensas e geraram particularidades.

A avaliação da mineralogia do arenito Sergi foi realizada pela Silva (2006) em lâminas delgadas impregnadas com resina acrílica de polimerização lenta (Araldite), para manter a integridade das amostras, e corante de cor azul (Azul de Oracet B), para realçar o espaço poroso. A impregnação das rochas foi feita sob vácuo e com resina colorida, segundo a metodologia proposta por Cesero *et al.* (1989), mostrada na Figura 3.01.

As lâminas foram preparadas no Laboratório de Preparação de Lâminas, do Departamento de Geologia da UFRJ.

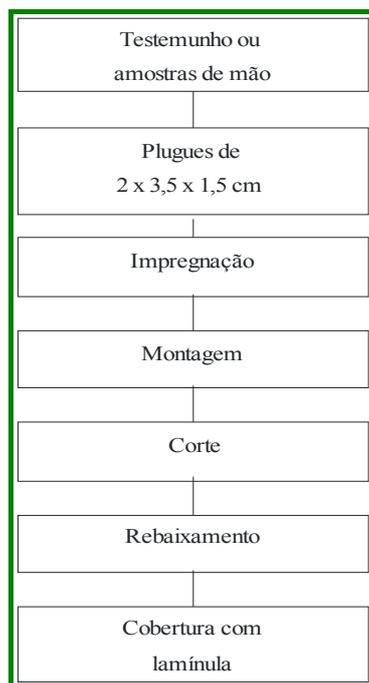


Figura 3.01 – Roteiro para confecção de lâminas delgadas impregnadas (Cesero et al., 1989).

Foram realizadas 2 lâminas para o arenito Sergi. Os dados apresentados na tabela 3.1 são referentes aos estudos petrográficos dos arenitos. Nessas lâminas foram determinados o teor de cimento, a porosidade média e a porcentagem de matriz, sendo que a matriz encontrada foi determinada apenas por difração de raios X e não por um contador de pontos. A Figura 3.02 ilustra a cimentação de sílica e os poros encontrados nos arenitos.

Os parâmetros texturais foram feitos através de um contador de pontos, acoplado ao microscópio, onde foram analisadas a composição mineralógica e classificação dos arenitos. Para o arenito Sergi foram feitos um total de 350 pontos para cada lâmina.

A análise dos arenitos e sedimentos recentes mostra que rochas são formadas por fragmentos da classe areia, os quais são compostos em sua grande maioria por quartzo, feldspatos e fragmentos de rocha.

Tabela 3.01 – Caracterização do Arenito Sergi

ARENITO SERGI	
Cimento	Ferro \approx 6,0%
Matriz	Caulinita (N.C.)
Porosidade	32,62%
<i>N.C.: não computado.</i>	

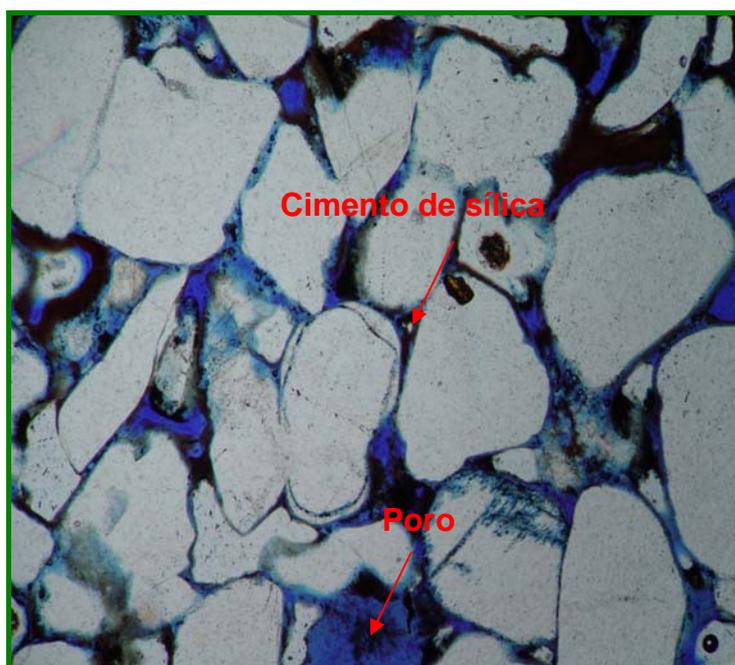


Figura 3.02.– Cimentação de Sílica e poros encontrados nos arenitos

O resultado da proporção de quartzo, fragmentos de rocha e feldspato presentes nos arenitos está apresentado na Tabela 3.2. Sendo que para esta classificação deve-se recalcular para 100% os percentuais quartzos, feldspatos e fragmentos de rochas encontrados na contagem de pontos.

Tabela 3.02 – Classificação do Arenito Sergi estudados (Pettijohn, 1975).

ARENITO SERGI	
Quartzo	80,9%
Feldspato	7,8%
Fragmentos de rocha	11,3%
Classificação (Pettijohn, 1975)	Subarcósea

3.1.2

Arenito Sintético

Devido à ausência de arenitos convencionais, foram utilizados materiais alternativos. A opção mais acessível ao momento foi empregar arenito sintético composto de areia, cimento Portland (cimento silicoso) e água, ou seja, argamassa. A confecção e o estudo das características destes arenitos fazem parte de um projeto de pesquisa desenvolvido no CENPES.

A areia selecionada possuía os grãos arredondados e granulometria grosseira, sendo bastante homogênea. O cimento utilizado foi Cauê Uso Geral CPII-F-32, sendo recomendado para qualquer aplicação em obras correntes de engenharia civil.

A razão cimento/areia em peso para confeccionar os corpos de prova foi igual a 1:5. A quantidade de água foi determinada para atender aos padrões de trabalhabilidade da mistura e também aos critérios de resistência preestabelecidos pelo projeto: resistência uniaxial aproximadamente de 10MPa aos 28 dias de cura.

A preparação e a moldagem dos corpos de prova foram realizadas no Laboratório de Estruturas do Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio, segundo a norma NBR-7215 da ABNT. Os corpos de prova possuem diâmetro igual a 50 mm e altura igual a 100 mm. Estes foram moldados em 3 camadas para evitar a segregação excessiva, sendo que cada camada recebeu 30 golpes. Após a moldagem os corpos de prova foram colocados em uma câmara úmida por 24 horas e em seguida, foram imersos em um tanque de cura até completarem 28 dias.

Para o cálculo da porosidade aparente foi empregada a fórmula abaixo:

$$\eta = \frac{P_{\text{sat}} - P_{\text{seco}}}{P_{\text{sat}} - P_{\text{sub}}} \times 100\%$$

Tabela 3.03 – Porosidade aparente das amostras do Arenito Sintético.

Amostra	Peso seco (g)	Peso saturado(g)	Peso submerso(g)	η (%)
CP-6A	333,2	393,55	201,53	31,4
CP-4C	298,7	350,47	181,95	30,3
CP-9	361,4	421,92	222,1	30,3
CP-1B	325,61	387,7	197,88	32,7
CP-3B	295,45	346,86	178,04	30,5
CP-5B	297,3	354,51	182	33,2
CP-8B	297,3	354,51	182	33,2
CP-9B	323,53	386,74	196,5	33,2
CP-10B	310,01	363,3	190,82	34,6
CP-11B	329,51	393,11	201,77	33,2
CP-13a	301,99	354,32	186,46	31,2

O ensaio de compressão uniaxial e o ensaio Triaxial foi realizado no Laboratório de Mecânica de Rochas do Centro de Pesquisas da Petrobras S.A. (CENPES) no Rio de Janeiro para verificar se os resultados atenderiam aos critérios de resistência preestabelecidos no projeto, que seria uma resistência máxima de 10MPa para estes corpos de prova.

Utilizou-se uma máquina de ensaios servo-controlada MTS, modelo 815.02, com rigidez de 10 GN/m e capacidade de 2700 KN em compressão. Para as medidas das deformações axial e radial utilizou-se extensômetros elétricos modelos 632.11C-20 (axial) e 632.92C-03 (radial), cujas sensibilidades são de 2,386 mili V / V (axial) e 0,765 mili V / V (radial).

Nesta pesquisa adotou-se ensaio de Compressão Simples c/ carregamento e descarregamento e taxa de deslocamento radial de 2,5 $\mu\epsilon$ /seg. A amostra sofreu um carregamento de 4MPa. Em seguida fez seu descarregamento e posteriormente o seu carregamento até romper. Figura (3.03).

O corpo de prova cilíndrico (13A) apresentava as seguintes dimensões: diâmetro NX (50,0 mm) e altura 100,0 mm. Os resultados atenderam aos critérios de resistência preestabelecidos no projeto, sendo verificada a resistência média de 10MPa para estes corpos de prova.

Para os ensaios Triaxiais, os corpos de prova cilíndricos 1B, 11B, 9B e 6A também apresentavam as mesmas dimensões do corpo de prova 13A. Nestes

ensaios triaxiais foram estabelecidas tensões desviadoras de 5MPa, 7MPa, 18MPa e 10MPa. Quando atingidas, foi feito o descarregamento até 0 e em seguida carregado até a ruptura. No gráfico 3.04 são apresentadas às curvas de tensão Desviadora vs. Deformação axial dos corpos de prova. No trecho pós pico não houve nenhuma queda de pressão, o que levou a caracterizar o arenito sintético como um material dúctil. No gráfico 3.05 são apresentadas às curvas de Deformação axial – Deformação Volumétrica dos ensaios triaxiais dos corpos de prova.

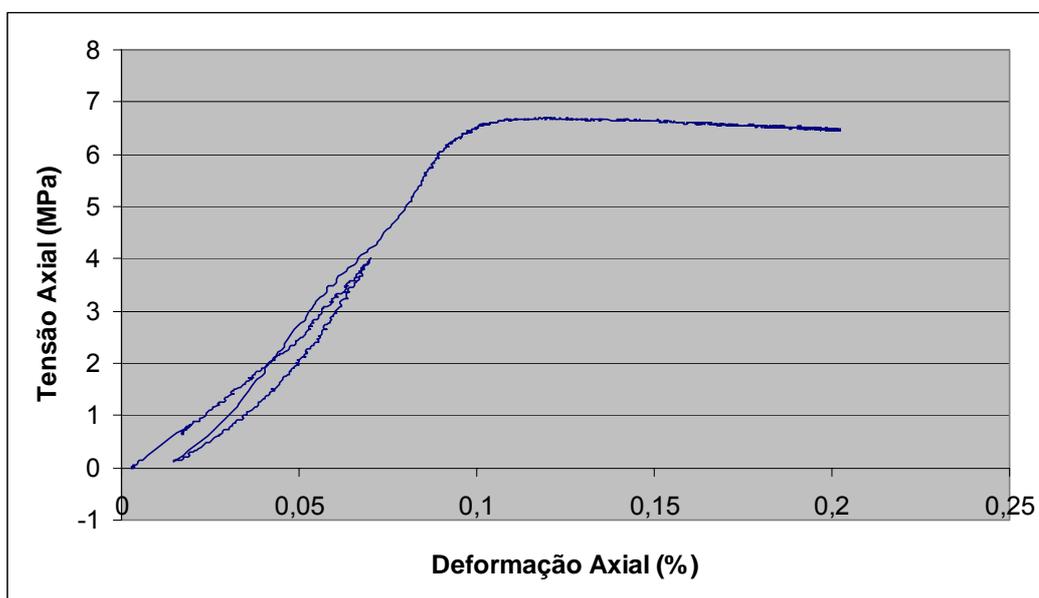


Figura 3.03 – Curva tensão x deformação axial da amostra 13A.

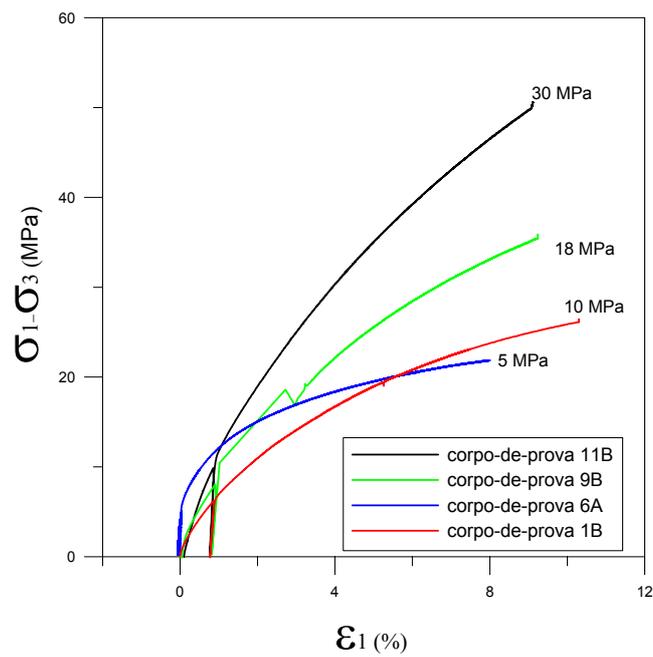


Figura 3.04 – Curva tensão x deformação axial das amostras.

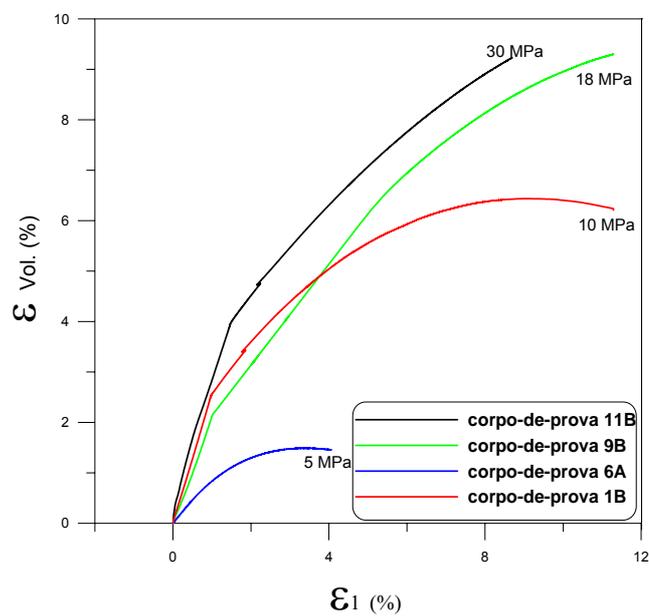


Figura 3.05 – Curva Deformação Axial x deformação Vol. das amostras.

3.2

Equipamentos Utilizados

A seguir são citadas as principais características dos equipamentos utilizados neste trabalho.

3.2.1

Célula de Pressão

Uma célula especialmente planejada, mostrada na Figura 1, foi construída para executar o programa experimental descrito na sessão anterior. A célula é capaz de aplicar pressões axial e radial na amostra. Embora não seja usada no atual estágio da pesquisa, a célula também permite a circulação de fluido tanto no sentido axial quanto no radial na amostra. O corpo da célula de pressão foi feito de alumínio de alta resistência normalmente usado na indústria de aeronaves. O alumínio foi usado por ser relativamente transparente aos raios X e, portanto, por permitir a visualização dos processos que ocorrem dentro das amostras de arenito testadas. As partes restantes da célula são feitas de aço. A célula foi planejada para pressões internas de 40 MPa e 25 t de carga axial. Nenhum instrumento de medida de deformações da amostra foi usado nos testes.

O diâmetro do corpo de prova é igual a 50 mm e pode ter altura entre 80 a 120 mm.

O projeto da célula está apresentado nas figuras 3.05 e 3.06 e a figura 3.07 mostra uma foto desta.

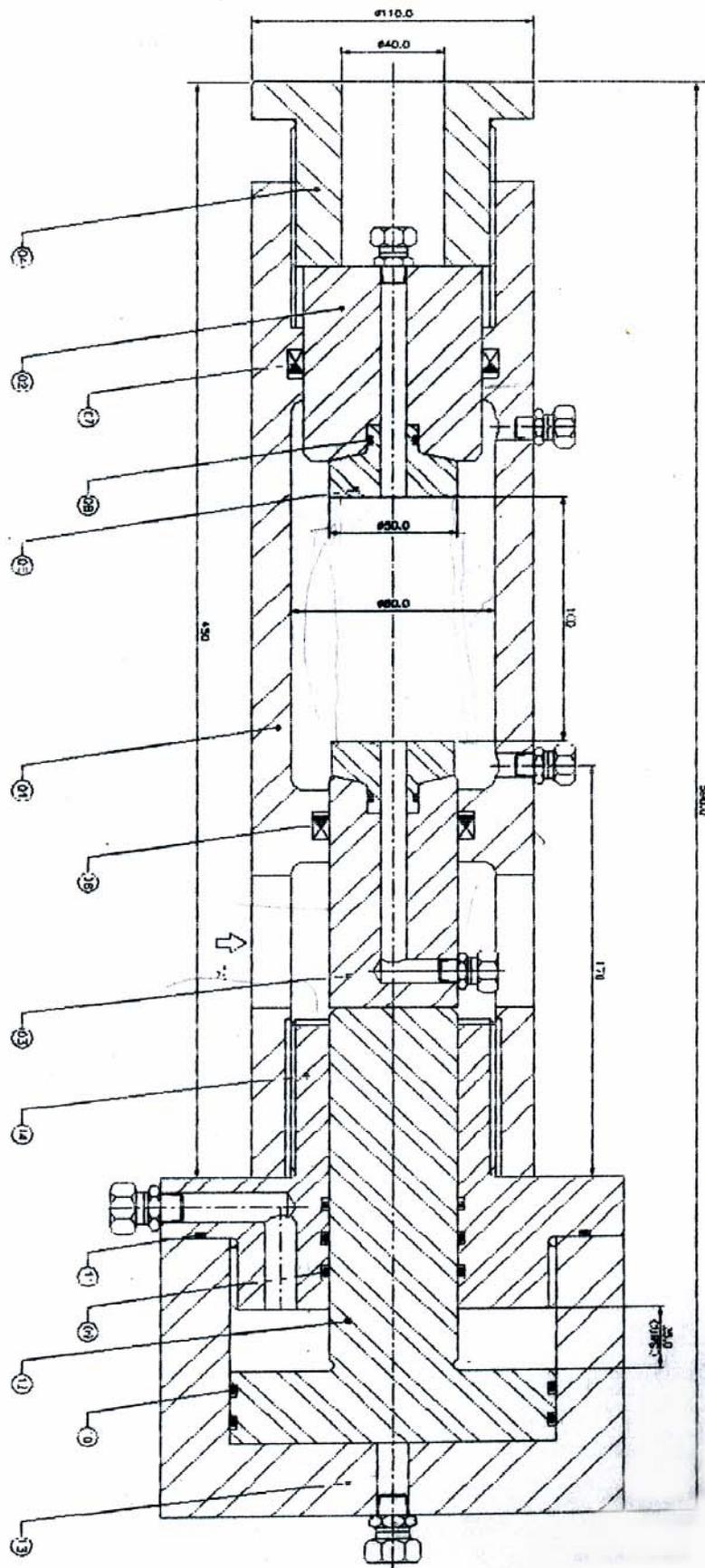


Figura 3.06 – Projeto da célula de Pressão.

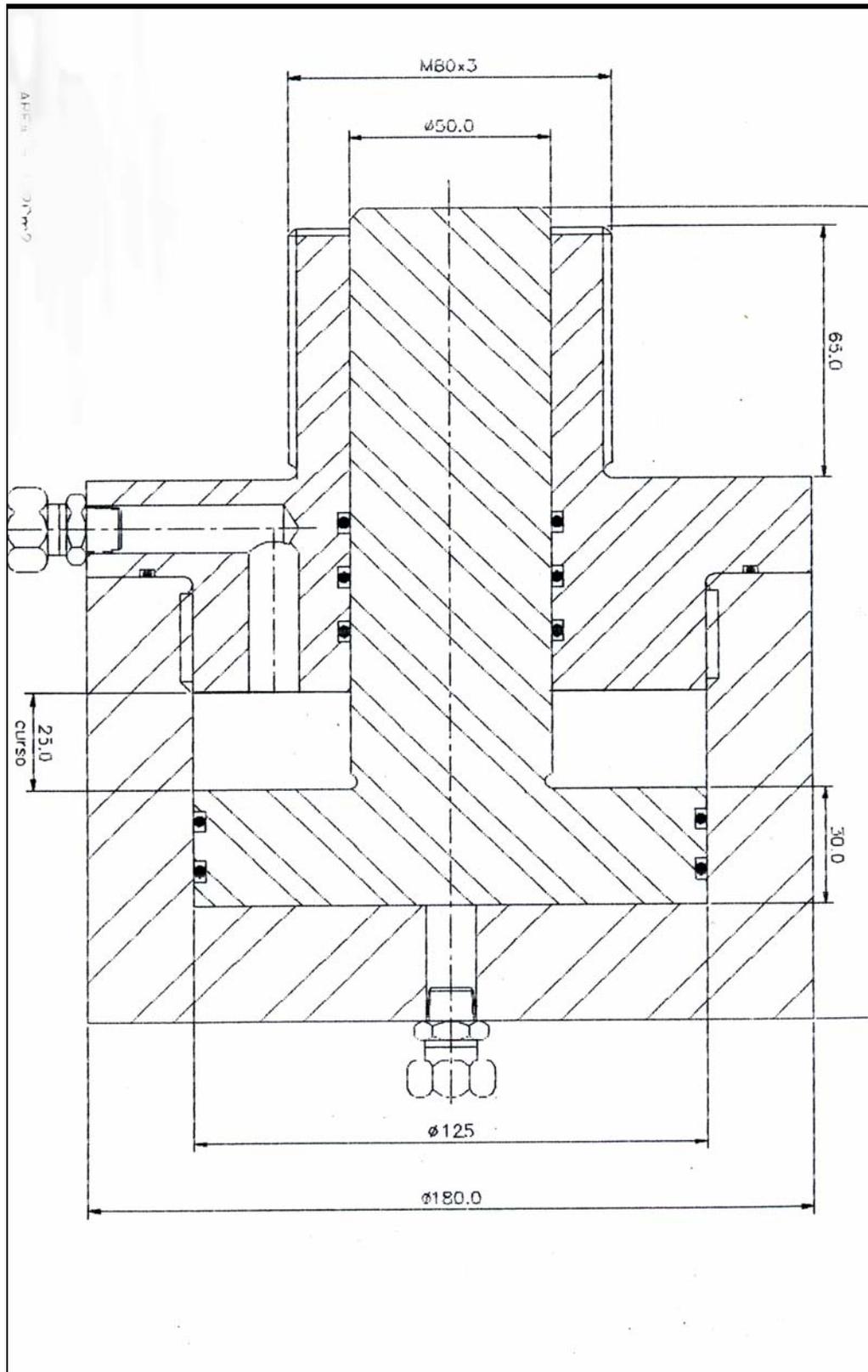


Figura 3.07 – Detalhe da câmara de tensão axial no projeto da célula.



Figura 3.08 – Fotografia da Célula.

3.2.2 Pressurizador



Figura 3.09 – Fotografia do controlador/atuator Pressurizador.

O Pressurizador é um controlador e atuador digital hidráulico utilizado para aplicar e controlar precisamente medidas de pressão e volume. Com este instrumento aplica-se pressão e vazão estipuladas com o carregamento contínuo e gradativo.

O Pressurizador faz o uso de um software Pavitest que foi desenvolvido com o intuito de servir como suporte na realização de ensaios. E software é instalado em um computador e que por sua vez conectado no Pressurizador.

Para uma melhor compreensão deste software serão mostradas na figura 3.10 a 3.14 algumas telas de execução.

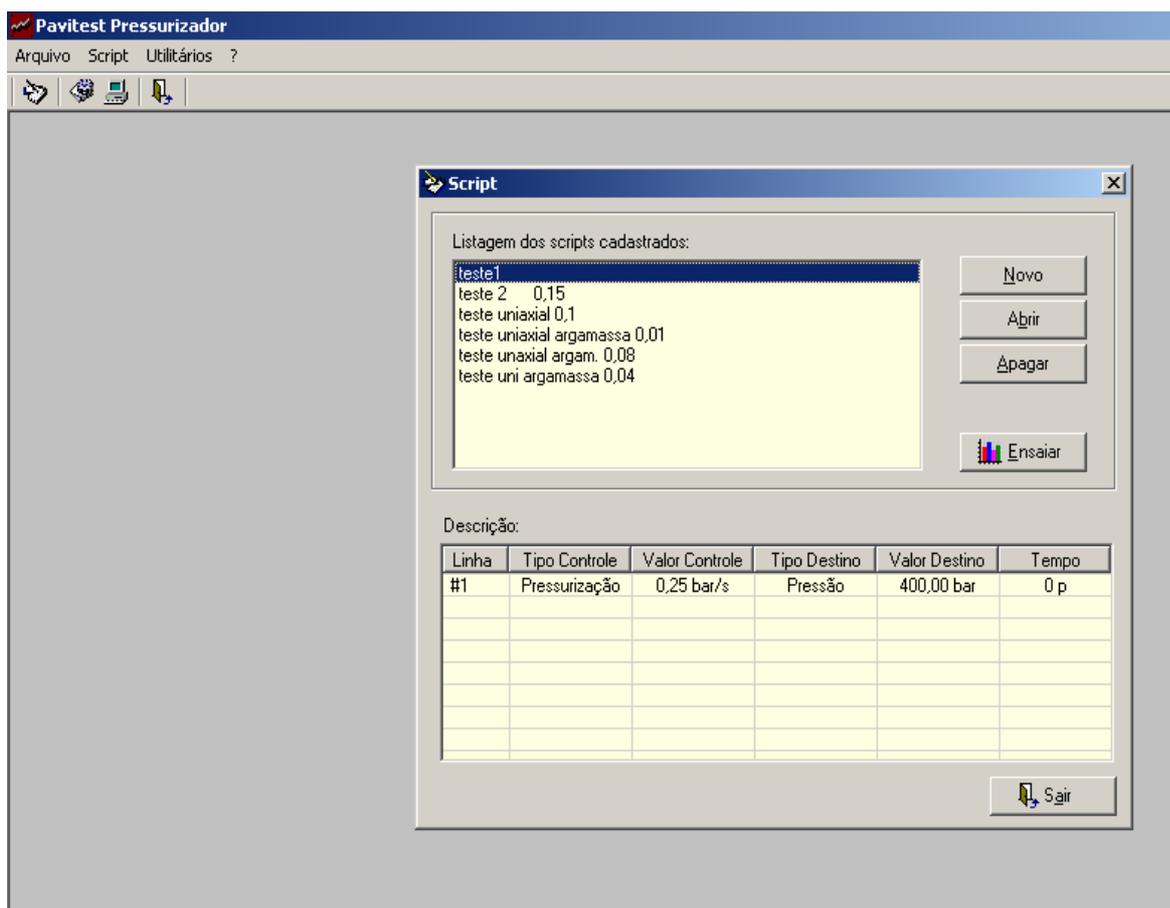


Figura 3.10 – Cadastro do Corpo de Prova

É nesta janela de listagem em que toda e qualquer atividade (Cadastrar, editar, apagar e ensaiar o script) irá começar.

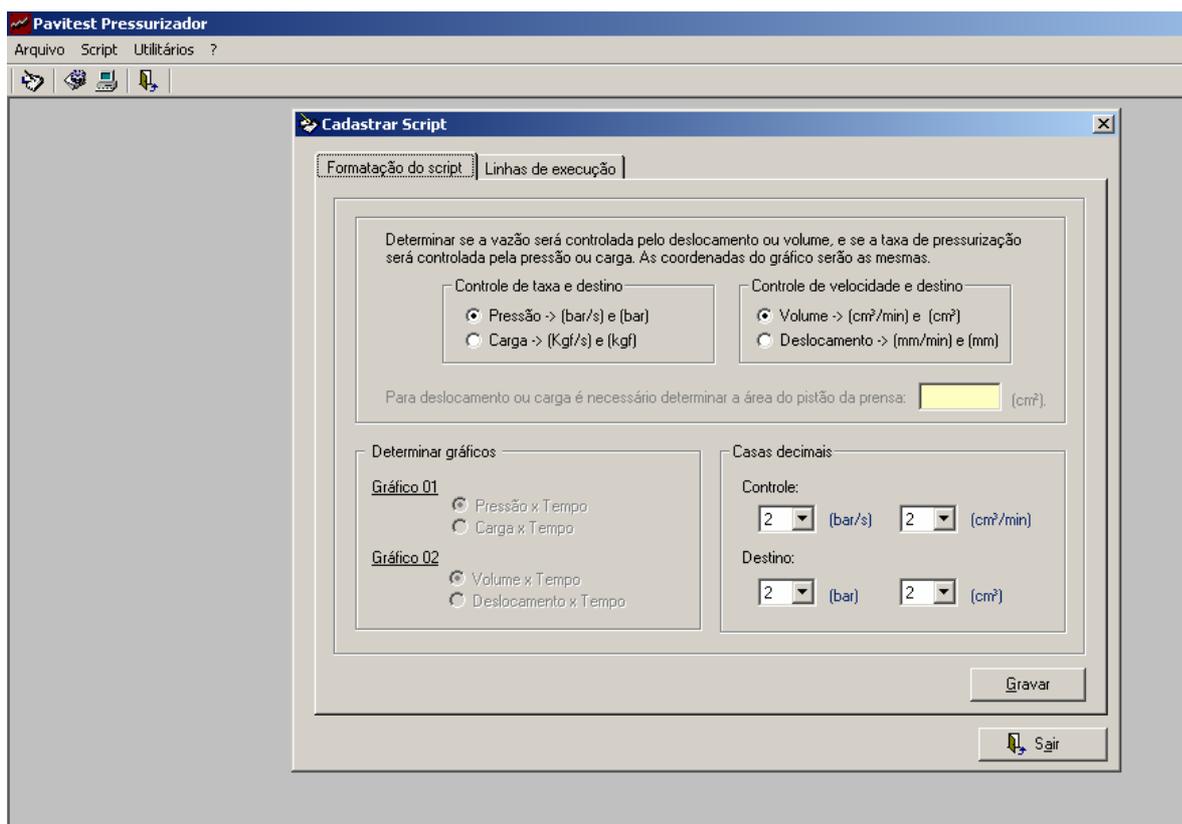


Figura 3.11 – Cadastro do Corpo de Prova.

Nesta tela fornece as combinações e limites para o cadastro de um novo Corpo de Prova.

Este equipamento tem capacidade volumétrica de 300 cm^3 e a taxa máxima de vazão é $210 \text{ cm}^3/\text{min}$ e a pressão máxima é 70 MPa e foi disponibilizado pelo Departamento de Engenharia Civil (PUC).

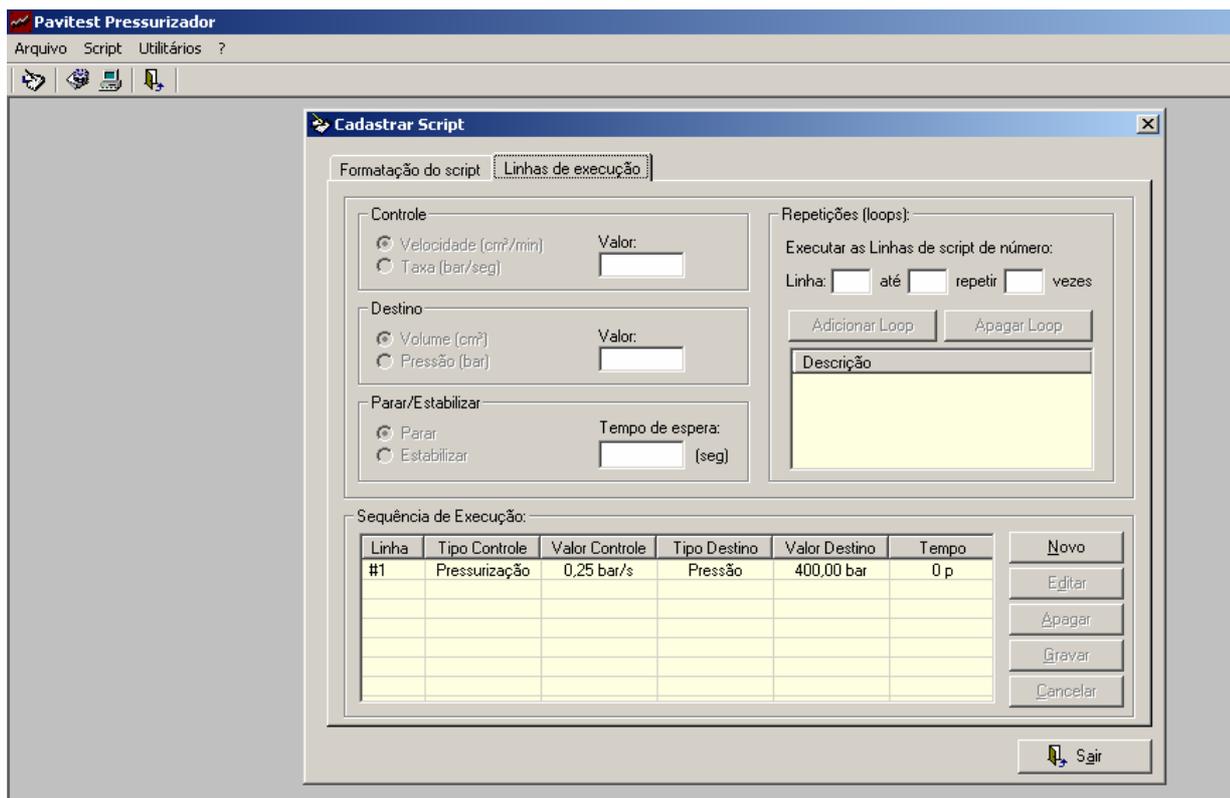


Figura 3.12 – Cadastro do Corpo de Prova.

Nesta tela, é feito de acordo com os parâmetros estabelecidos na figura 3.11 o cadastro dos valores das taxas de controle.

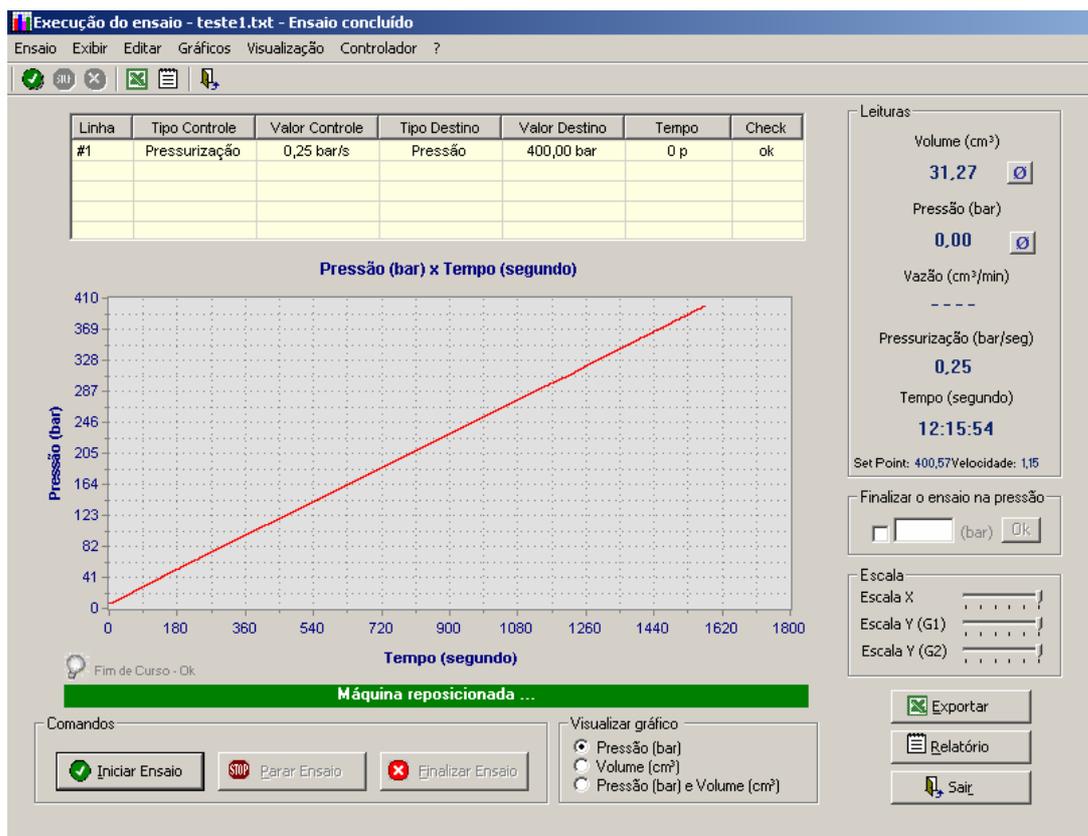


Figura 3.13 – Tela de entrada do ensaio.

Ao entrar nesta tela os dados de pressão e volume estarão sendo atualizados. Enquanto o ensaio estiver em andamento, os dados de leitura do ensaio serão atualizados de acordo com o intervalo de tempo para aquisição, e o gráfico será atualizado de acordo com a quantidade de intervalos já pré configurados.

Ao fim do de um ensaio, os dados podem ser exportados para uma planilha, clicando no botão exportar.

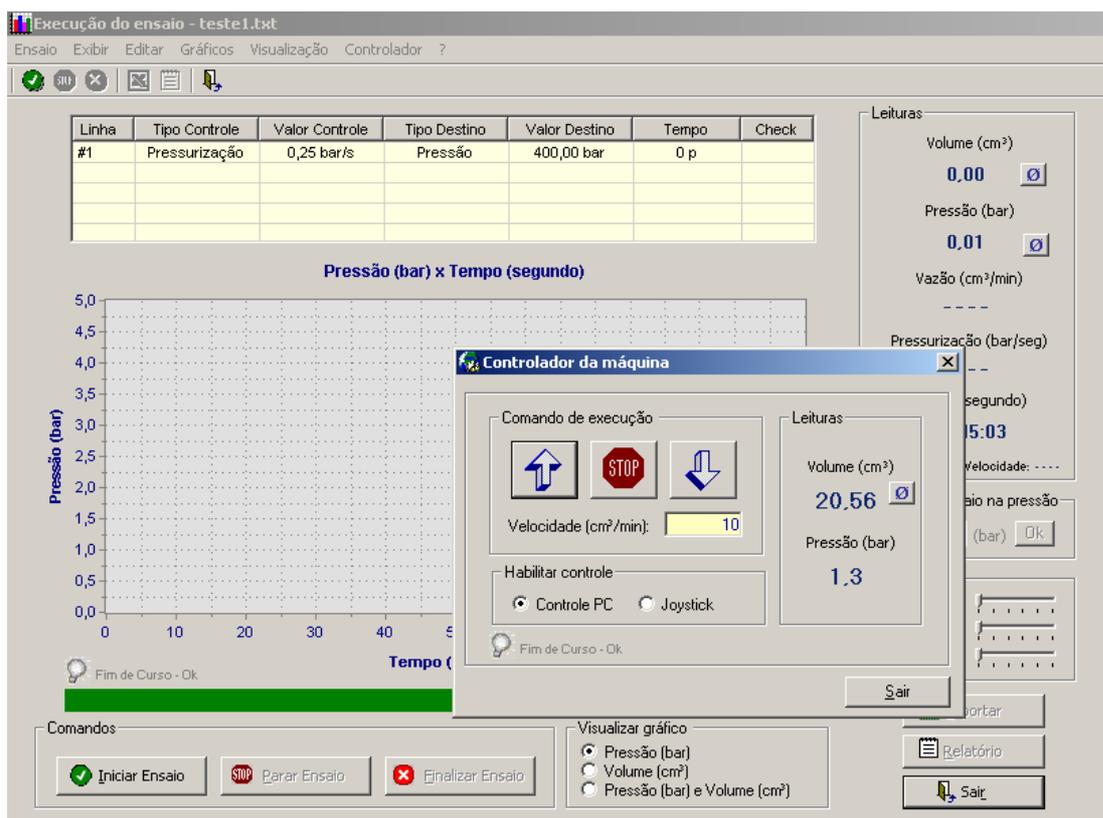


Figura 3.14 – Tela de entrada do ensaio.

Ao entrar na tela do ensaio, ficará habilitado antes do início uma janela “controlador de máquina” que serve para dar uma pré carga com a finalidade de ajustar o corpo de prova na célula e tirar o ar caso haja.

3.2.3

Atuador Hidráulico Manual

Trata-se um macaco hidráulico manual da marca ENERPAC com capacidade máxima igual a 10.000 psi.

3.2.4

Tomógrafo

O tomógrafo médico utilizado neste trabalho é da marca PICKER-PQS com 1200 detectores, instalado no Laboratório de Tomografia Computadorizada de Raios X do CENPES. Dados de entrada para a realização da tomografia:

Nível de energia = 130 kV;

Amperagem = 100mA,

Tempo de aquisição de cada seção = 4 segundos;

Algoritmo = Padrão (STD);

Espessura das seções transversais = 5mm

Espaçamento entre as seções = 5mm

Contraste (dopante)= não possui;



Figura 3.15 – Tomógrafo Médico.

3.3

Preparação dos Corpos de Prova

Para a realização dos ensaios de produção de areia, os corpos de prova cilíndricos, os arenitos sintéticos foram perfurados axialmente. Dessa forma, foi possível a simulação do poço de petróleo e com isto os corpos de prova assumiram a forma cilíndrica-vazada (TWC). Esta cavidade coaxial foi executada no torno mecânico através de uma broca de vídea com diâmetro igual a 16mm.

Santos (2004), a razão raio externo do corpo de prova (R) / raio interno da cavidade (r) é igual a 3,125 que está dentro dos limites da Solução de Kirsch (Goodman,1980) que estabelece razão a R/r entre 3 e 4, para evitar efeitos de extremidades provocados, neste caso, pela pressão confinante.



Figura 3.16 – Corpos de prova após a perfuração: á esquerda arenito sintético e á direita arenito Sergi.

3.4

Metodologia de Ensaio

Utilizando-se de *caps* apropriados para o ajuste na célula, estes são os *caps* de fixação do corpo de prova à célula envolvidos com fita de alta fusão para obter uma boa aderência da membrana ao conjunto. A membrana de borracha termo-retrátil da marca Raychen, com retração até 25mm, é retraída e aderida ao corpo de prova utilizando-se o soprador térmico de 1800W que atinge temperaturas de até 600°C. Em seguida, as bases são amarradas com arame para uma melhor vedação do corpo de prova (Figuras 3.17 a 3.20) .



Figura 3.17 – Montagem do Corpo de prova. Os caps estão envolvidos com fita alta fusão.



Figura 3.18 – Soprador térmico e corpo de prova envolvido pela membrana termo-retrátil.



Figura 3.19 – Retração da membrana devido ao calor.



Figura 3.20 – Amarração com arame.

Após a preparação do corpo de prova, este é encaixado no interior do vaso de pressão da célula. Em seguida, preenche-se a câmara com óleo ENERPAC e coloca-se o êmbolo superior. O movimento deste êmbolo é impedido com a colocação de uma tampa rosqueada, formando assim um tipo de “quadro de reação”.



Figura 3.21 – Colocação do corpo de prova.



Figura 3.22 – Colocação do óleo na célula.



Figura 3.23 – Colocação do êmbolo superior.



Figura 3.24 – Travamento do sistema com a tampa rosqueada.

Por fim, a célula e o macaco hidráulico e o Pressurizador, devidamente conectados à entrada da pressão axial e à entrada da pressão confinante, respectivamente, são posicionados na mesa do tomógrafo para a aquisição de imagens em tempo real à realização do ensaio.



Figura 3.25 – Visão geral do ensaio.

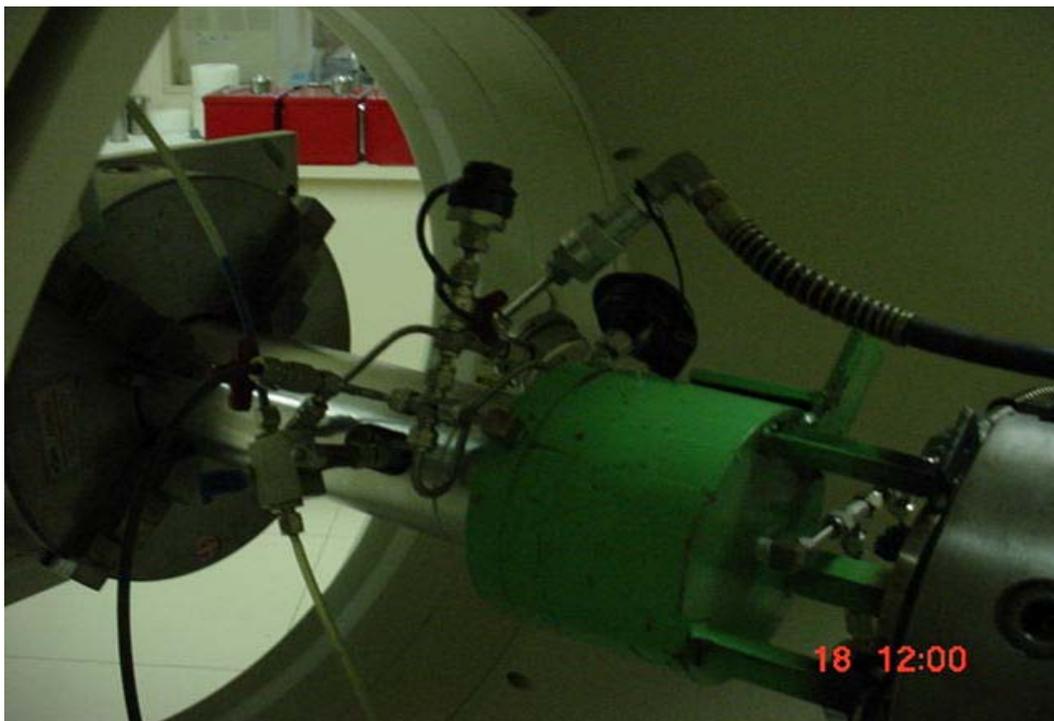


Figura 3.26 – Detalhes do posicionamento da célula.

Em seguida é realizado um ensaio radiográfico que consiste de um exame longitudinal do corpo de prova. As imagens obtidas através deste exame é resultado da atenuação dos raios X emitidos por uma fonte posicionada acima deste corpo. Faz-se passar o corpo de prova pela fonte enquanto detectores de radiação posicionados abaixo dele registram a intensidade de radiação absorvida pelo material da amostra.

As imagens obtidas através deste exame longitudinal podem ser compreendidas como uma projeção de todo o corpo de prova, e não possuem a precisão de um ensaio tomográfico propriamente dito. Servem também como orientação para a elaboração do plano de cortes transversais a ser mostrado no capítulo 4. Por esta razão estas imagens são chamadas imagens pilotos. Este plano de cortes, utilizado em todas as etapas dos testes, apresenta seções transversais com espessura e espaçamento de 5mm.

A metodologia consistiu primeiramente em aplicar uma pequena pressão axial com o macaco hidráulico para a fixação do corpo de prova aos pistões (inferior e principalmente superior) da célula. Para a aplicação da pressão confinante empregou-se o Pressurizador. Através deste, se estabeleceu uma rampa de pressão igual a: 0 a 40 MPa em aproximadamente 35 minutos.