4. PROGRAMA EXPERIMENTAL

A metodologia adotada pode ser dividida em duas partes principais: a primeira, trata-se da caracterização dos arenitos utilizadas nos ensaios de produção de areia e, a segunda parte, consiste em desenvolver a metodologia para a realização destes.

4.1. Caracterização dos Arenitos

Não é tarefa fácil compreender as propriedades geomecânicas de rochas sedimentares. 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.

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 serão 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 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 afetarão a compactação e a cimentação dos sedimentos, alterando assim propriedades como porosidade, permeabilidade e resistência do material.

4.1.1. Arenito Rio Bonito

As amostras do arenito Rio Bonito estudadas neste trabalho, foram coletadas de afloramento da Bacia do Paraná, no Estado do Paraná. A Bacia sedimentar do

Paraná, cujo nome foi tomado da bacia hidrográfica do rio homônimo, distribui-se pelos estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina, Paraná, São Paulo, Minas Gerais, Mato Grosso do Sul, Mato Grosso e Goiás. Sua área total no Brasil é da ordem de 1.100.000 km², ocupa também parte dos territórios do Paraguai (100 000 km²), Uruguai (100.000 km²) e Argentina (100.000 km²) (Barroso,2002). A Bacia do Paraná possui uma forma alongada de direção NNE-SSW com cerca de 1.750 km de comprimento e 900 km de largura médios (ZaIán *et al.*, 1990).

A avaliação da mineralogia do arenito Rio Bonito foi realizada em lâmina petrográfica estudada por Barroso (2002). As seções delgadas impregnadas foram confeccionadas utilizando-se resina acrílica de polirnerização lenta (Araldite) e corante de cor azul (Azul de Oracet B) para o preenchimento dos vazios. A impregnação das rochas foi feita sob vácuo e com resina colorida, segundo a metodologia proposta por Cesero *el al.* (1989). mostrada no diagrama da figura 4.01.

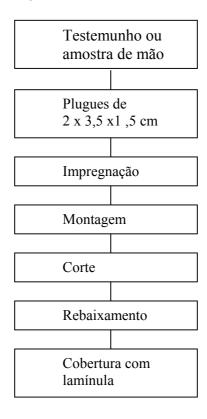


Figura 4.01 – Roteiro para confecção de lâminas delgadas impregnadas (Cesero *et al.*, 1989).

A composição mineralógica do arenito Rio Bonito está relatada na tabela 4.01.abaixo.

Elementos	Rio Bonito	Rio Bonito	Rio Bonito	
	(G1) (%)	(G2) (%)	(G3) (%)	
Quartzo	63,1	60,3	60,1	
Feldspato	8,7	9,6	9,6	
Fragmentos de	1,3	1,7	0,9	
Rocha				
Matriz	6,3	5,2	4,4	
Cimento de Sílica	0,5	0,7	0,2	
Porosidade	19,8	22,5	24,8	

Tabela 4.01 – Composição do arenito Rio Bonito. (Barroso,2002)

É importante ressaltar que no caso do areinto Rio Bonito considera-se como matriz as partículas menores que 0,03 mm. Em geral são minerais do grupo das argilas (e.g. caulinitas, ilitas, cloritas, esmectitas), porém grãos de quartzo, feldspatos e outros minerais, de tamanho silte médio a fino também podem estar presentes. A mineralogia da fração argila do arenito Rio Bonito revelou a presença de caulinita, interestratificados de ilita-esmectita, mica, quartzo e feldspato.

É possível notar que a soma dos percentuais de feldspato e matriz é aproximadamente constante, entre 14 e 15%. Este fato provavelmente indica que a matriz da rocha não é detrítica ou transportada, mas deve ter se formado "in situ" a partir da alteração intempérica dos próprios feldspatos (Barroso, 2002). Tendo em vista a elevada variabilidade apresentada pelo arenito Rio Bonito quanto ao número de poros, agrupou-se as amostras em três grupos distintos.

Para o desenvolvimento deste trabalho foram utilizadas amostras pertencentes ao grupo 1, devido ao esgotamento de amostras do grupo 2 e 3.

Para um estudo mais detalhado sobre a composição mineralógica do arenito Rio Bonito, foi realizada microscopia eletrônica com análise química em duas lâminas de amostras pertencentes ao grupo 1. A microscopia foi executada no microscópio eletrônico de varredura (MEV), da marca Zeiss, modelo 960 DSM (Digital Scanning Microscope), pertencente ao Laboratório de Microscopia Eletrônica do Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia, da PUC-Rio.

As lâminas para a microscopia foram confeccionadas de acordo com o procedimento descrito anteriormente sem a cobertura com lamínula no laboratório de Laminação do Departamento de Geologia da UFRJ. Em seguida, sobre estas,

depositou-se um filme de ouro através de uma evaporadora - Sputter Coater, da marca Balzers, modelo SCD 050 também pertencente ao Laboratório de microscopia eletrônica do Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia, da PUC-Rio.

A partir da microscopia realizada na lâmina na amostra 697-RB, pode-se notar que o contato entre os grãos dos minerais é baixo. Além disso, estes grãos são 'arestados' (angulosos) confirmando que estes não sofreram transporte por gravidade. A cimentação é frágil, não preenchendo todo espaço do poro. Os poros são pouco conectados, o que confere baixa permeabilidade para a amostra. Através da análise química, foram identificados os minerais constituintes, confirmando ao resultado da análise petrográfica realizada por Barroso (2002).

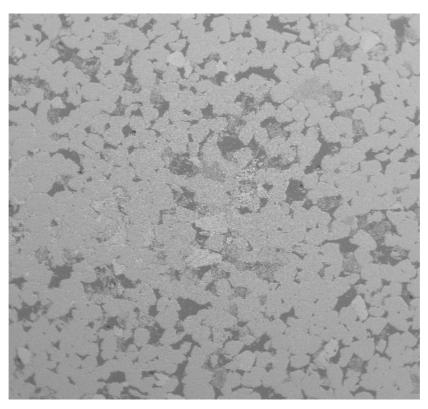


Figura 4.02 – Visualização da amostra 697-RB aumentada 20 vezes.

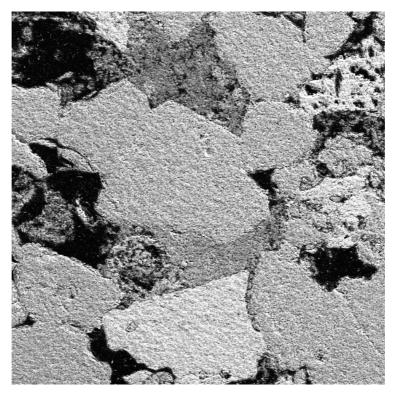


Figura 4.03 – Visualização da região central da amostra 697-RB aumentada 100 vezes.

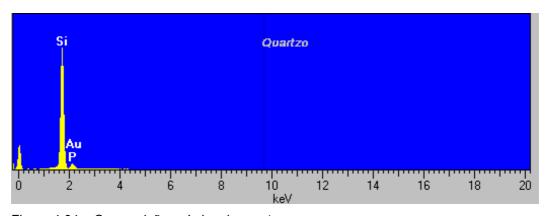


Figura 4.04 – Composição química do quartzo.

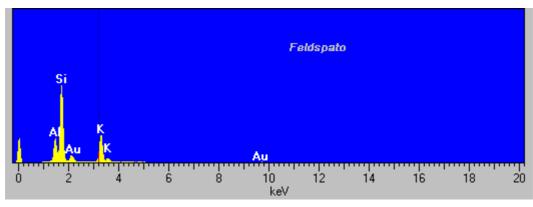


Figura 4.05 – Composição química do feldspato -potássico .

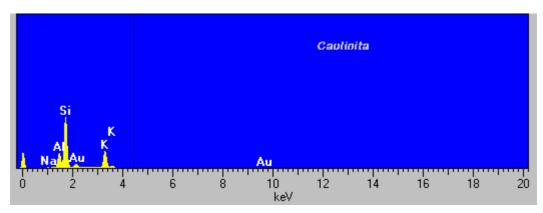


Figura 4.06 – Composição química da caulinita.

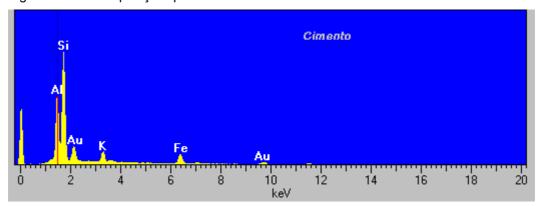


Figura 4.07 – Composição química do cimento silicoso.

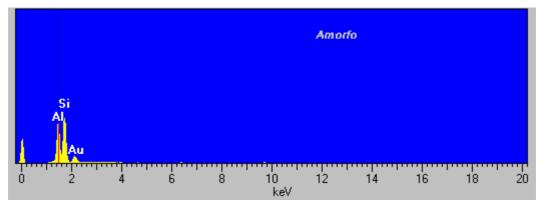


Figura 4.08 – Composição química do argilomineral amorfo.

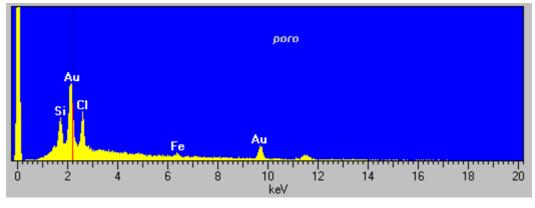


Figura 4.09 – Composição química do poro. Estes elementos fazem parte da composição química da resina araltide.

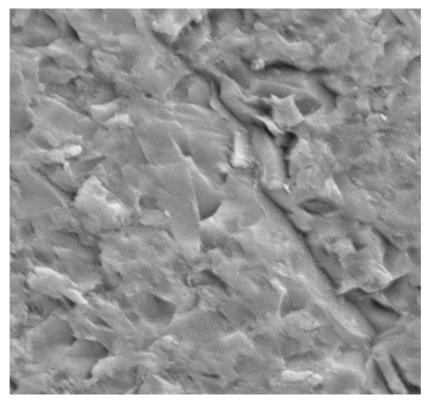


Figura 4.10 - Contato entre grãos de feldspato com aumento de 2000 vezes.

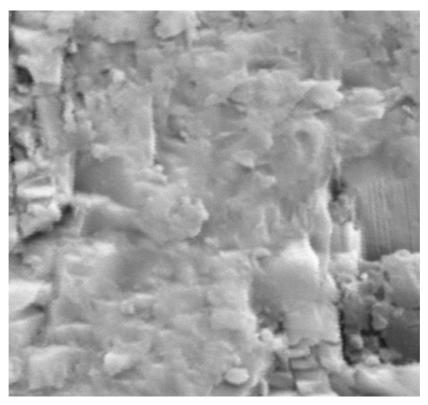


Figura 4.11 – Estrutura de um grão de caulinita com aumento de 3000 vezes da amostra 697-RB.

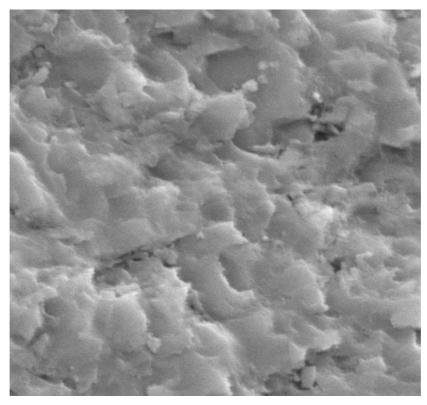


Figura 4.12 – Estrutura de um grão de feldspato com aumento de 3000 vezes da amostra 697-RB.

Os mesmos minerais acima mencionados, foram identificados na análise química da amostra 699-RB, exceção feita pelos grãos de titânio (grão mais claro da figura 4.13) presentes nesta amostra. Em relação a organização dos grãos, esta se dá de forma diferente da amostra 697-RB. A amostra 699-RB apresenta maior número de poros e cimentação secundária. Como os grãos apresentaram aspecto áspero quando aumentados em 100 vezes, pode ser um indício de algum processo de alteração química.

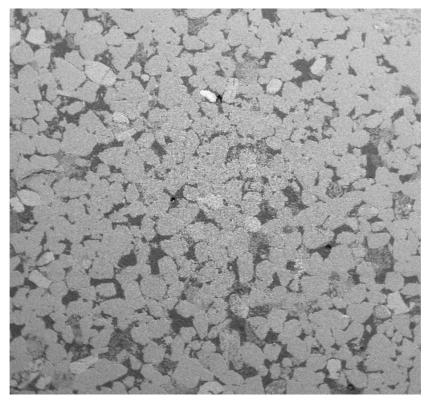


Figura 4.13 – Visualização da amostra 699-RB aumentada 20 vezes.

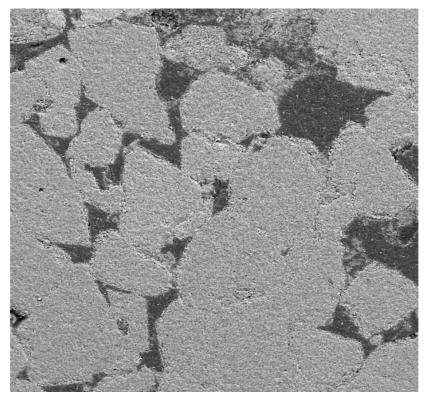


Figura 4.14 – Visualização da região central da amostra 699-RB aumentada 100 vezes.

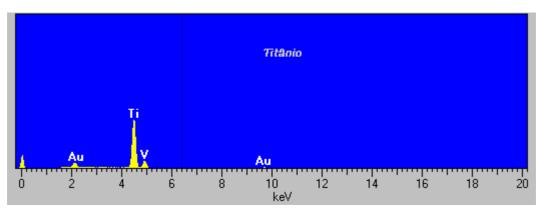


Figura 4.15 – Composição química do titânio. Este, provavelmente foi transportado, devido a existência de pouquíssimos grãos.

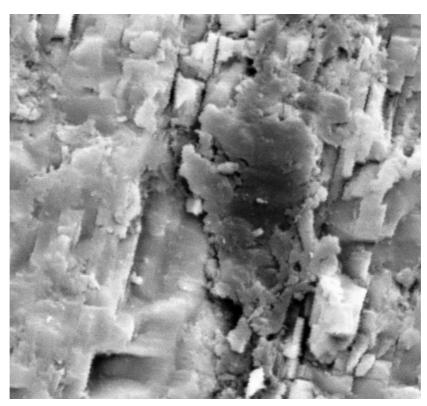


Figura 4.16 – Estrutura de um contato entre grãos de caulinita (região mais escura) e feldspato com aumento de 3000 vezes da amostra da amostra 699-RB.

Para a preparação dos corpos de prova, blocos de rochas foram coletados em afloramentos fazendo-se uso de marteletes a ar comprimido. No laboratório foram extraídos corpos de prova cilíndricos com diâmetro de 54 mm (padrão NX). Devese mencionar a perda de vários corpos de prova, tanto relacionada à presença de fraturas nos blocos, quanto à desagregação da matriz da rocha frente à água, o fluido de perfuração utilizado.

Para essa pesquisa procurou-se atender as sugestões da ISRM (1981). Os

corpos de prova foram preparados de tal maneira que o acabamento final estivesse próximo das recomendações daquela sociedade, embora nem sempre tenha sido possível cumprir as exigências quanto a rugosidade das superfícies dos topos do corpo de prova. Isto se deve ao arrancamento dos grãos da matriz durante o processo de usinagem, comentado a seguir. Devido as espessuras dos blocos levados ao laboratório foram obtidos corpos de prova com relações altura / diâmetro em torno de 2.0.

A preparação tem início com o corte dos testemunhos visando colocá-los em tamanho próximo ao comprimento final. Utilizou-se uma serra de bancada muito bem ajustada, nivelada e o disco diamantado livre de pequenos empenos para evitar a quebra dos testemunhos durante essa etapa.

A etapa seguinte consiste da usinagem em torno mecânico da superfície externa e dos topos dos testemunhos, visando a retificação das imperfeições deixadas nos processos de sondagem e corte dos materiais.

A porosidade aparente das amostras foi determinada segundo a norma da ABNT - NBR 12766. As amostras permaneceram em estufa à 60°C por 24 horas e em seguida foram pesadas (peso seco). Em seguida, as amostras foram resfriadas em temperatura ambiente e colocadas imersas em água destilada em um dessecador. Após duas horas, foi aplicado vácuo por um período de aproximadamente 6 horas para a saturação. Vale ressaltar que fez-se o controle da saturação através da verificação de constância do peso das amostras (peso saturado). Por fim, a partir das amostras saturadas obteve-se o peso submerso.

Deve-se mencionar que, mesmo com os cuidados adotados durante o processo de saturação alguns corpos de prova foram perdidos na tentativa de saturá-los com água. A desagregação da rocha deve estar relacionada à presença de argilominerais do grupo das esmectitas, como verificado na etapa de caracterização petrográfica.

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

$$\eta = P_{\text{sat}} - P_{\text{seco}} \quad x \quad 100\%$$

$$P_{\text{sat}} - P_{\text{sub}}$$
(4.01)

Os valores da porosidade aparente determinada para as amostras de Rio Bonito estão na tabela 4.02.

Tabela 4.02 – Porosidade aparente das amostra de Rio Bonito.

Amostra	Peso seco (g)	Peso saturado(g)	Peso submerso(g)	η (%)
697-RB	337,92	367,89	204,12	18,3
698-RB	414,00	450,73	251,50	18,4
699-RB	322,32	355,19	193,32	20,3
700-RB	420,89	454,92	255,08	17,0
702-RB	399,74	440,91	241,36	20,6
709-BR	359,35	392,33	216,36	18,7
711-RB	351,22	379,31	224,12	18,1
713-RB	358,13	384,99	231,50	17,5
720-RB	394,40	435,30	238,67	20,8
721-RB	358,56	394,41	218,42	20,4
722-RB	361,93	400,34	218,04	21,1
723-RB	360,00	428,28	86,88	20,0
724-RB	331,32	365,22	200,50	20,6
725-RB	314,88	347,40	189,99	20,7
726-RB	318,33	352,45	190,51	21,1
730-RB	318,97	349,84	192,10	19,6
731-RB	351,51	389,45	214,29	21,7
732-RB	355,03	391,73	215,12	20,8
740-RB	371,69	404,90	226,16	18,6
741-RB	340,92	372,76	206,49	19,2
742-RB	394,42	430,58	239,66	18,9
743-RB	344,61	376,49	206,37	18,7
750-RB	380,00	415,20	243,49	20,5

Devido ao baixo número de amostras de Rio Bonito disponíveis, somente uma amostra foi submetida ao ensaio de compressão uniaxial para determinação da resistência. O ensaio de compressão uniaxial foi realizado no Laboratório de Mecânica de Rochas do Centro de Pesquisas da PETROBRAS S.A. (CENPES) no Rio de Janeiro. 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 a taxa de deslocamento circunferencial de 2,5 με/seg e foi colocada uma rótula no topo do corpo de prova conforme recomendação da ISRM (1981).

O corpo de prova cilíndrico 696-RB apresentava as seguintes dimensões: diâmetro NX (54,0 mm) e altura 100,0 mm. Este foi saturado a vácuo com óleo OB-9, cuja massa específica é de 0,84 g/cm³ e viscosidade de 1,1 cP.

A curva tensão x deformação axial está representada na figura 4.17.

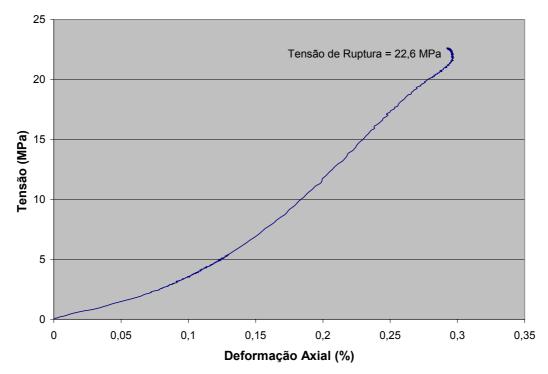


Figura.4.17 – Curva tensão x deformação axial da amostra 696-RB.

4.1.2. Arenito Sintético

Para tentar minimizar o problema de disponibilidade de amostras do arenito Rio Bonito, procurou-se utilizar 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 faz 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-E-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 1:3. 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 10 MPa 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.

A porosidade aparente dos corpos de prova foram medidas usando o mesmo procedimento utilizado para o arenito Rio Bonito. Notou-se que a porosidade média do arenito sintético é maior que a do Rio Bonito.

Amostra	Peso seco (g)	Peso saturado(g)	Peso submerso(g)	η (%)
CP-3	389,94	432,50	233,62	21,4
CP-4	400,14	435,87	237,37	18,0
V5-2	395,99	448,17	228,93	23,8
V8-2	398,19	445,12	253,57	24,5
V11	392,25	435,69	244,32	22,7
V12	402,17	451,09	239,32	23,1

Os ensaios de compressão uniaxial também foram feitos sob as mesmas condições utilizadas para os ensaios no corpo de prova 696-RB. Os resultados atenderam aos critérios de resistência preestabelecidos no projeto sendo verificada a resistência média de 9,3 MPa para estes corpos de prova.

4.2. Equipamentos Utilizados

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

4.2.1. Célula de Pressão

Esta célula foi desenvolvida especialmente para ensaios de produção de areia pois é capaz de aplicar pressões axial e confinante diferenciadas (ensaio triaxial) com circulação de fluido simultânea pela amostra.

O vaso de pressão confinante da célula foi feito em alumínio com o propósito de ser transparente ao tomógrafo, ou seja, poder visualizar o corpo de prova no seu interior. As outras partes como a câmara de pressão axial, pistão de aplicação da tensão axial, *caps* e êmbolo superior são confeccionados em aço. Para facilitar a operação da célula, esta possui uma série de acessórios para extração do corpo de prova após o ensaio.

As pressões máximas que podem ser aplicadas são: 30 MPa pressão confinante e 20 MPa de tensão axial aplicando uma força máxima de 25 ton ao corpo de prova. O curso do pistão inferior é de 25 mm. Esta célula não possui instrumentação para controle de deformações da amostra.

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 figura 4.18 e 4.19 e a figura 4.20 mostra uma foto desta.

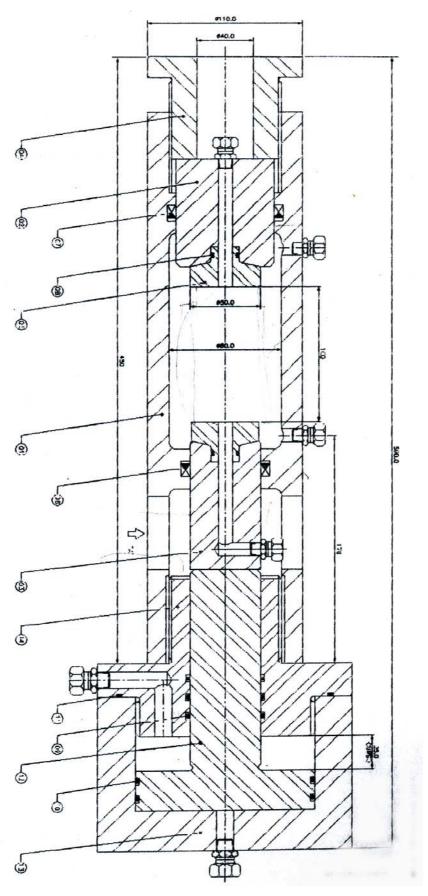


Figura 4.18 – Projeto da célula de Pressão.

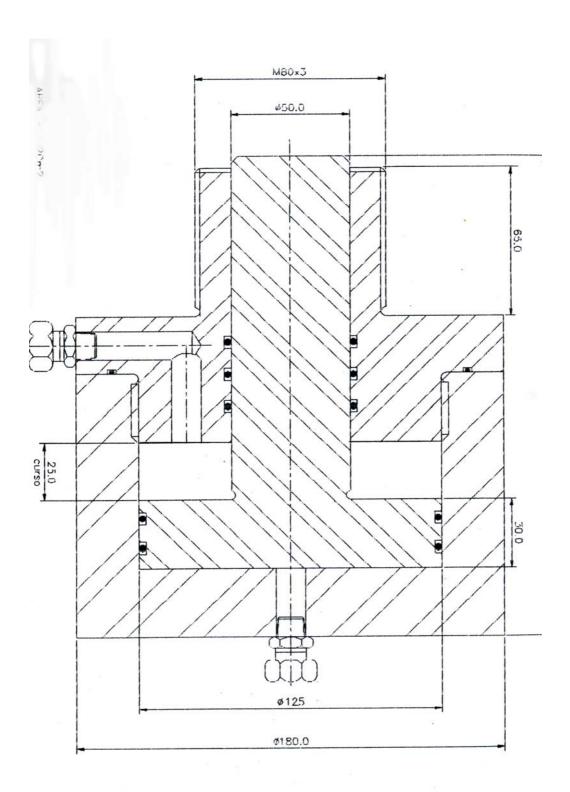


Figura 4.19 – Detalhe da câmara de tensão axial no projeto da célula



Figura 4.20 – Fotografia da célula.

4.2.2. GDS

O GDS é um controlador e atuador digital hidráulico utilizado para aplicar e controlar precisamente medidas de pressão e volume. Este instrumento além de aplicar pressão e vazão estipuladas, pode-se ainda realizar rampas e ciclos de carregamentos lineares com o tempo. O GDS está sendo amplamente empregado em ensaios em laboratório da mecânica dos solos e rochas. O funcionamento de GDS é simples: O óleo ENERPAC no cilindro é deslocado por um êmbolo movendo dentro deste. Este pistão é acionado por um motor de passo que se move retilineamente sobre um trilho. A pressão é medida através de um transdutor e a variação de volume pelo número de passos dados pelo incremento do motor.

Para esta pesquisa utilizou-se um GDS com capacidade máxima de pressão igual a 32 MPa e capacidade volumétrica de 200 cm³ emprestado pelo Laboratório de Interação Rocha-Fluido do GTEP, PUC-Rio.

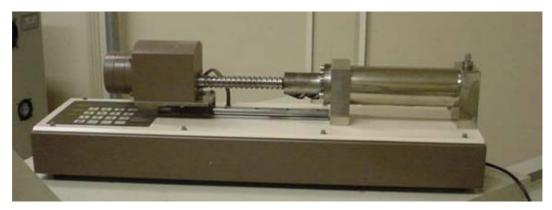


Figura 4.21 – Fotografia do controlador/atuador GDS.

4.2.3. Atuador Hidráulico Manual

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

4.2.4. Tomógrafo

Como já foi dito no capítulo 3, 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 = 5 mm

Contraste (dopante)= não possui;



Figura 4.22 – Tomógrafo Médico.

4.3. Preparação dos Corpos de Prova

Para a realização dos ensaios de produção de areia, os corpos de prova cilíndricos, tanto de arenito Rio Bonito quanto de arenito sintético, 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.

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 4.23 – Corpos de prova após a perfuração: à esquerda arenito Rio Bonito e à direita arenito sintético.

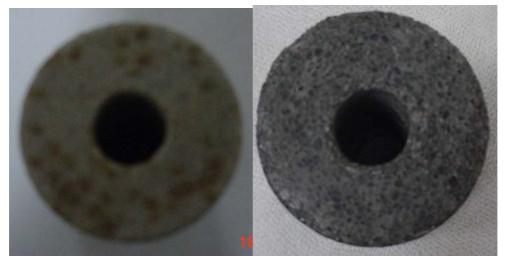


Figura 4.24 –Visão transversal dos corpos de prova: à esquerda arenito Rio Bonito e à direita arenito sintético.

4.4. Metodologia de Ensaio

Todos os corpos de prova foram saturados com água destilada a fim de reduzir ao máximo a resistência destes.

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 termoretrátil 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 (Ver figuras 4.25 a 4.28).



Figura 4.25 – Montagem do Corpo de prova. Os caps estão envolvidos com fita alta fusão.



Figura 4.26 – Soprador térmico e corpo de prova envolvido pela membrana termo-retrátil.



Figura 4.27 – Retração da membrana devido ao calor.



Figura 4.28 – 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 4.29 – Colocação do corpo de prova.



Figura 4.30 – Colocação do óleo na célula.



Figura 4.31 – Colocação do êmbolo superior.



Figura 4.32 – Travamento do sistema com a tampa rosqueada.

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

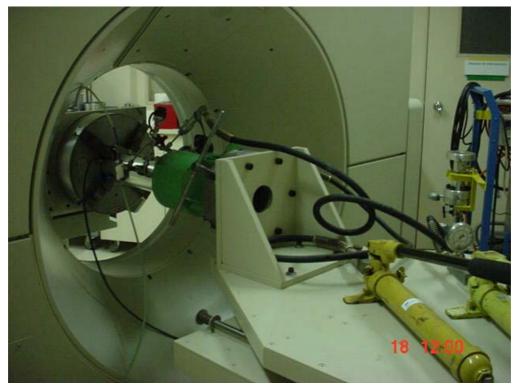


Figura 4.33 – Visão geral do ensaio.

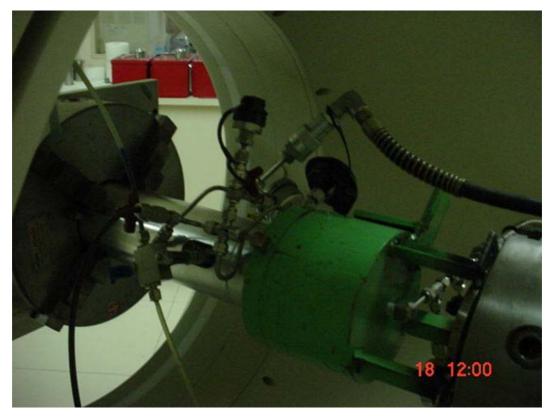


Figura 4.34 – Detalhes do posicionamento da célula.

Em seguida foi 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 executado conforme exemplificado na figura 5.01, 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.

Devido a dificuldades encontradas durante os ensaios de produção de areia em relação a induzir a ruptura da amostra, foram empregadas três metodologias diferentes para a aplicação do carregamento externo à amostra.

A primeira metodologia utilizada consistiu primeiramente em aplicar uma mínima pressão axial com o macaco hidráulico para a fixação do corpo de prova aos pistões (inferior e principalmente superior) da célula (esta primeira etapa é comum as demais metodologias).

Para a aplicação da pressão confinante empregou-se o GDS. Através deste, se estabeleceu uma rampa de pressão igual a: 0 a 30 MPa em 30 minutos. Este valor de 30 MPa foi estabelecido com base na Teoria da Elasticidade que assume o fator de concentração de tensões mínimo igual a 2 para cavidades cilíndricas. Julgando, portanto, que uma pressão igual a 30 MPa ou inferior, seria suficiente para provocar a ruptura da cavidade interna da amostra. Todavia, devido ao insucesso dos ensaios realizados com esta metodologia, pois a pressão de 30 MPa estabelecida não foi suficiente para induzir a ruptura da amostra, esta metodologia foi reformulada. Eliminou-se o uso do GDS, pois havia necessidade de um equipamento com maior capacidade de aplicação de pressão.

A solução disponível ao momento foi utilizar outra bomba hidráulica manual (70MPa) para a aplicação da pressão confinante. Substitui-se, portanto, a taxa de carregamento linear por estágio de pressões confinante Surgindo, assim, a segunda metodologia aplicada aos ensaios.

A terceira metodologia adotada, devido a problemas relacionados com a capacidade suporte da célula em relação à segunda metodologia, consistiu em aumentar a pressão axial durante a aplicação da pressão confinante.

Em qualquer metodologia utilizada, a aquisição de imagens foi realizada em tempo real a execução do ensaio.