

5 Procedimento Experimental

5.1. Introdução

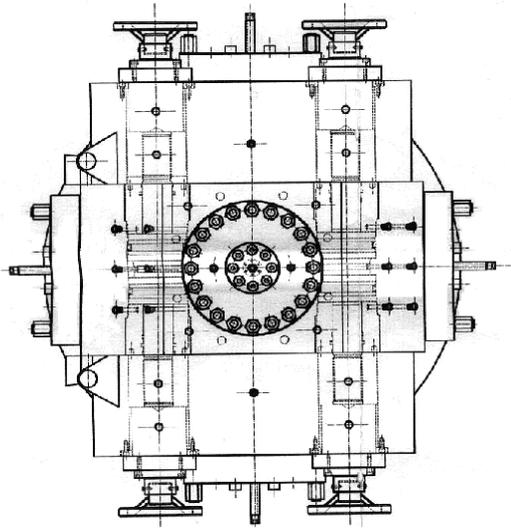
Os ensaios desenvolvidos neste trabalho requerem o uso de blocos de arenito sintético com um furo centralizado. No furo foram instalados sistemas de contenção de areia variando-se a dimensão do *gravel* utilizado e a centralização da tela. Os tubos foram instrumentados com medidores de deformação. Com o sistema bloco-*gravel*-tela montado, este é colocado em uma prensa poliaxial onde será carregado até a ruptura.

5.2. Célula Poliaxial

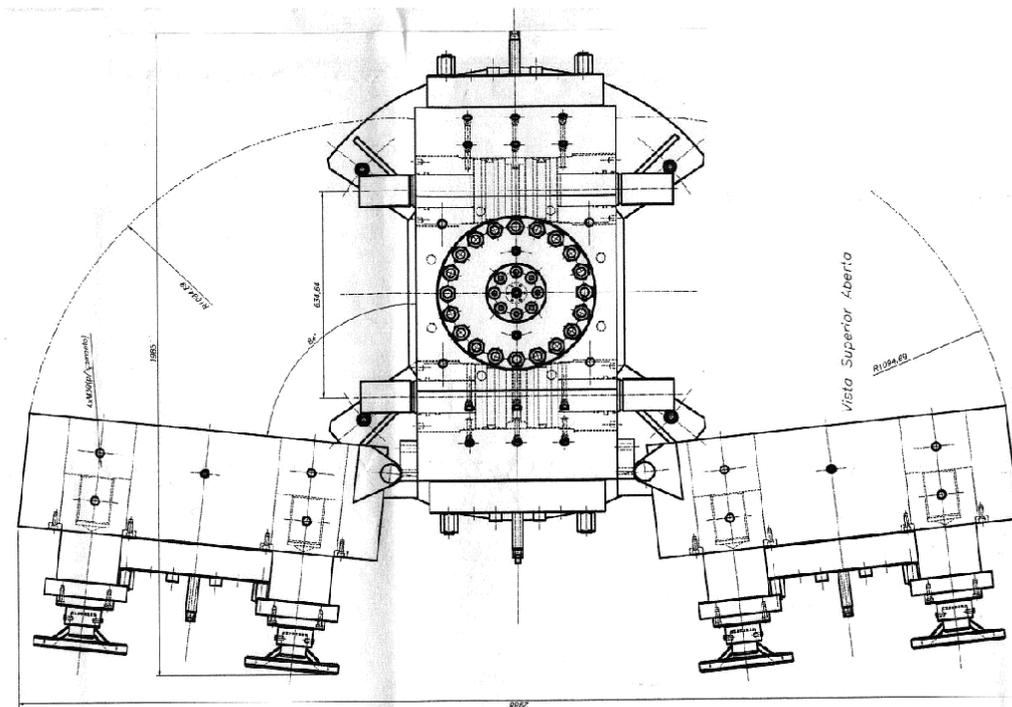
O equipamento permite realizar ensaios em amostras de até 30 cm de aresta e conta com estrutura suficiente para instalação de instrumentação. O sistema de aplicação consiste em três sistemas hidráulicos independentes, um para cada par de atuadores, sendo a carga máxima projetada para cada um dos seis atuadores 500 tonf, que corresponde a uma tensão de 62,54 MPa.

O manuseio das amostras é difícil, devido ao seu tamanho e peso, sendo necessário desenvolver “mecanismos de colocação” das mesmas no interior do equipamento, que em seu estado inicial contava com espaço para movimentação e acesso.

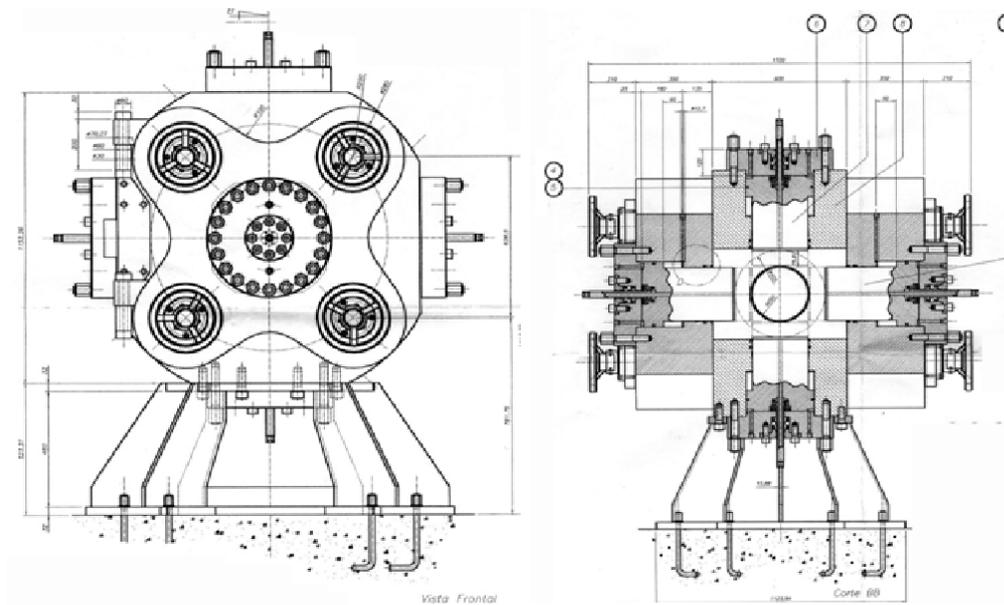
Um esquema do projeto da célula está apresentado nas figuras 5.1 (a) a (d).



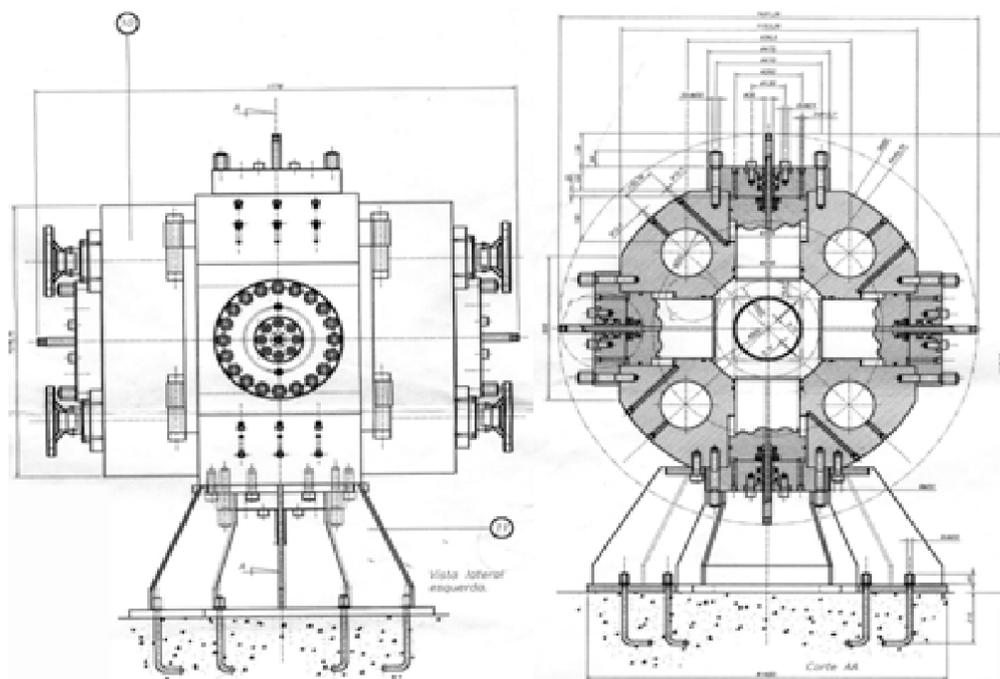
(a) Vista superior da célula fechada.



(b) Vista superior da célula aberta.



(c) Vista frontal e corte.



(d) Vista lateral e corte.

Figura 5.1 – Detalhes da célula poliaxial (Bloch, 2003).

- Sistema de Válvulas

O sistema de válvulas também é de difícil manuseio e está composto por 26 válvulas. (fig. 5.2 e 5.3). Estas são acionadas e controladas manualmente, conforme mostrado no quadro 5.1.

Quadro 5.1 – Definição das linhas Hidráulicas de Acionamento da Célula Poliaxial (Bloch, 2003).

Eixos de direção	Linha de alta Pressão Movimentação dos pistões para comprimir a amostra	Linhas de baixa pressão Movimentação de retorno dos pistões	Linha de Dreno
X	$X_e^+ ; X_e^- ;$	$X_r^+ ; X_r^- ;$	$X_d^+ ; X_d^- ;$
Y	$Y_e^+ ; Y_e^- ;$	$Y_r^+ ; Y_r^- ;$	$Y_d^+ ; Y_d^- ;$
Z	$Z_e^+ ; Z_e^- ;$	$Z_r^+ ; Z_r^- ;$	$Z_d^+ ; Z_d^- ;$



Figura 5.2 - Válvulas de acionamento da célula poliaxial.

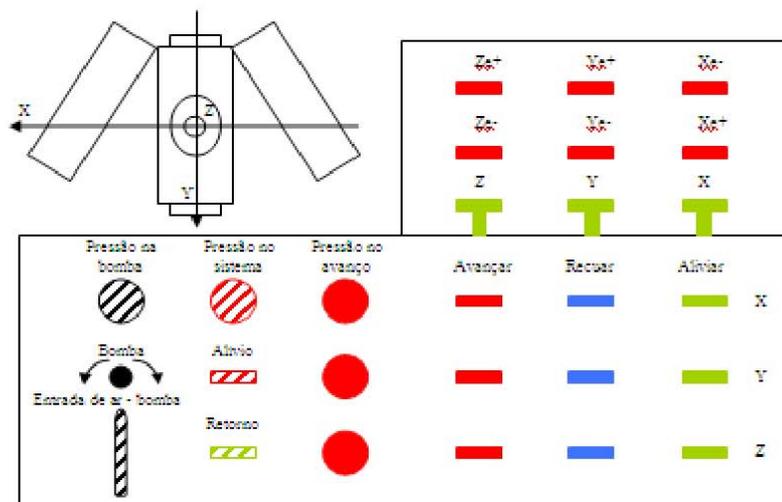


Figura 5.3 – Esquema de funcionamento das válvulas (Bloch, 2003).

Além desse sistema de válvulas, foi instalado um outro sistema em paralelo, para que a aproximação dos pistões fosse mais rápida e com menor pressão (fig. 5.4). Com esse sistema, foi possível realizar leituras em intervalos menores de pressão, com precisão de ± 20 psi.



Figura 5.4 – Sistema de válvulas secundário.

- Atuadores

Para minimizar os efeitos de borda provocados por pistões cilíndricos, foram instalados espaçadores quadrados em cada um deles. As placas de aço, com espessura de 2 centímetros, foram projetadas de forma a suportar as pressões sem sofrerem deformações significativas e transmiti-las de maneira uniforme. Para a

instalação, foram feitos 4 “rasgos” a fim de facilitar o encaixe das placas na posição desejada, afixadas com 4 parafusos do *allen*, conforme mostrado nas figuras 5.5 e 5.6.



Figura 5.5 – Instalação dos atuadores.



Figura 5.6 – Placas e parafusos utilizados.

5.3. Confeção dos Corpos de Prova

Rochas sintéticas oferecem a possibilidade de realizar ensaios em condições mais próximas do ideal e com determinados parâmetros sendo estudados de forma controlada. Outro ponto considerado nesta escolha, foi a dificuldade de cortar blocos de arenito convencional com a dimensão desejada. Além do mais, blocos de rochas sintéticas, confeccionados com materiais alternativos, vêm sendo utilizados por diversos pesquisadores (Dam *et al*, 2000; Tronvoll *et al*, 1997; Kooijman *et al*, 1992), sendo a argamassa utilizada como elemento padrão deste estudo.

Os primeiros corpos de prova (CP) usados para testes no equipamento, foram confeccionados no Laboratório de Estruturas do Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio. No total, foram moldados 25 CP's cúbicos, de 30 cm de aresta e furo centralizado com 6 cm de diâmetro, sendo os cinco primeiros de concreto e os seguintes de uma mistura de argamassa corrente e areia, sem o controle de nenhum parâmetro (fig. 5.7) A figura 5.8 mostra o molde utilizado na segunda fase. Essas dimensões foram definidas a fim de minimizar a influência do furo na alteração do estado de tensão original da formação; reduzida a partir de distâncias 4 a 8 vezes o seu raio.



Figura 5.7 – Corpos de prova sintéticos.



Figura 5.8 – Forma utilizada para moldar os blocos da segunda fase.

Para a preparação dos corpos de prova de arenito sintético utilizados nos testes finais, foram estudados a composição mineralógica, o tamanho e a forma

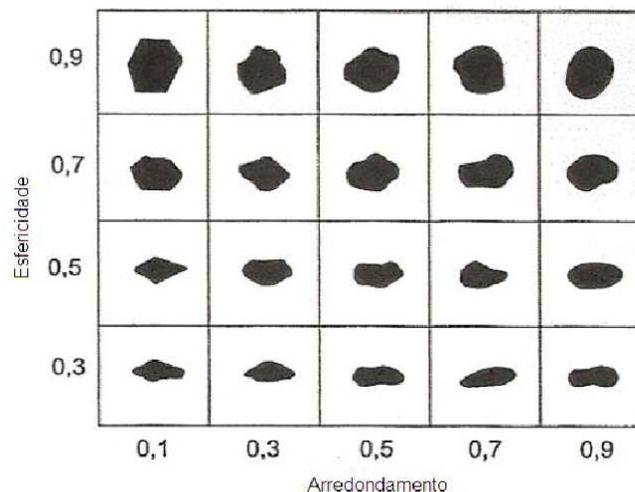
dos grãos e o traço que correspondessem aos arenitos citados nos estudos de produção de areia.

A areia selecionada é desagregada, predominantemente composta por grãos de quartzo, mas constituída também por grãos de feldspato, biotita, muscovita, turmalina, ilmenita, óxido de ferro, fragmentos de bioclastos e de um contaminante não identificado. Os detalhes estão no apêndice A.

Este material é moderadamente a pobremente selecionado, com intervalo granulométrico variando de areia muito fina a grossa (material retido na peneira 50% #100, 30% 50 e 20% #30).

A esfericidade (medida do quanto a partícula de areia ou grão se aproxima da forma de uma esfera) e o arredondamento (medida relativa da forma de contorno ou curvatura de um grão) dos grãos foram determinados de acordo com o quadro 5.2 a partir de uma análise da imagem obtida por um microscópio eletrônico de varredura (fig. 5.9). Os valores de esfericidade e arredondamento obtidos para os minerais que aparecem em maior quantidade na amostra foram: quartzo – 0,7 e 0,3; feldspato – 0,3 e 0,9; ilmenita – 0,5 e 0,5.

Quadro 5.2 – Diagrama para estimativa visual de esfericidade e arredondamento (API, 1995).



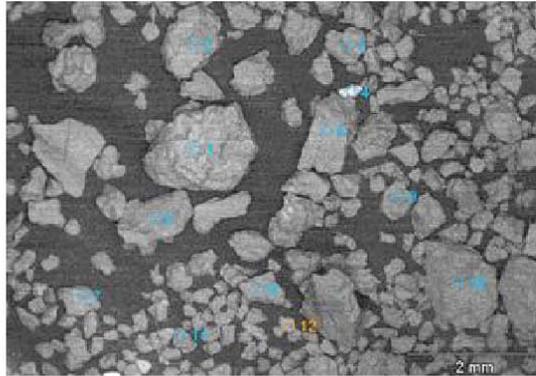


Figura 5.9 – Imagem da areia por Microscópio Eletrônico de Varredura - MEV.

Tabela 5.1 – Traços testados e seus respectivos valores de resistência à compressão uniaxial.

Amostra		Traço (em volume)				Resistência (MPa)	
Referência	C P	Cimento *	Areia **	Resina ***	Água	Brasileiro	Uniaxial
T0	1	1.0	--	--	0.85	2.67	--
	2					1.91	9.78
	3					2.08	23.42
	4					0.78	18.23
T1	1	1.0	1.0	--	1.20	3.90	35.15
	2					4.25	35.82
T2	1	1.0	3.0	--	0.60	1.97	22.62
	2					2.83	20.21
T3	1	--	2.5 kg	750g/225g/22 5g	--	17.26	38.45
	2					11.88	49.60
T4	1	0.5	4.0	75g/22.5g/22. 5g	1.60	1.76	--
	2					1.06	8.86
	3					0.98	7.92
	4					1.09	6.01
	5					--	12.20
T5	1	1.0	4.0	--	1.60	2.99	16.73
	2					2.15	11.06
	3					2.26	--
	4					--	8.75
T6	1	1.0	5.0	--	1.60	1.53	11.11
	2					2.05	8.02
	3					2.13	10.23
	4					2.17	11.48
T7	1	1.0	5.0	--	2.40	--	9.06
	5					--	4.15
	8					--	7.50
	13					--	5.40
	14					--	5.53
	17					--	7.87
18	--	8.75					

* Cimento do tipo CP-II

** Areia material passante na peneira 16 e retido na 25 e 100

*** Resina composta por GY1109, A830 e A850 respectivamente

Como material ligante, foi utilizado o cimento Nassau Uso Geral CII-F-32, que é recomendado para aplicação corrente em obras de Engenharia Civil.

Para definir o traço adequado às necessidades do estudo, foram realizados ensaios de resistência à compressão uniaxial em CPs com 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura. Variaram-se as proporções de cimento, água, areia e resina, em oito traços diferentes. Os detalhes estão na tabela 5.1.

A razão cimento/areia/água, em volume, adotada para confeccionar os CPs foi 1,0 : 5,0 : 2,4. Este traço atendeu aos critérios de resistência pré-estabelecidos pelo estudo – resistência uniaxial de aproximadamente 6 MPa aos 7 dias de cura, com tolerância de variação de $\pm 30\%$. Este critério foi definido com base na literatura (Tronvoll *et al*, 1997). Além disso, o a alta porcentagem de areia na mistura foi critério decisivo na escolha do traço.

Definido o traço, foram moldados mais corpos de prova com 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura, para os ensaios triaxiais. A partir dos resultados obtidos, foi possível caracterizar o material, determinando o ângulo de atrito, coesão, módulo de elasticidade e coeficiente de poisson. Estes valores encontram-se na tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Propriedades do arenito sintético.

Parâmetro	Resultado
Ângulo de Atrito	34 °
Coesão	2,70 MPa
Módulo de Elasticidade	2,40 GPa
Coeficiente de Poisson	0,30

A preparação e a moldagem destes blocos foram realizadas no Laboratório de Simulação Física do TEP. Para que a mistura ficasse homogênea, foi utilizada uma betoneira (fig. 5.10). Estes CPs possuem as mesmas dimensões dos confeccionados na PUC-Rio e foram moldados em 3 camadas, sendo cada uma vibrada mecanicamente (fig. 5.11). Após a moldagem, os CPs foram deixados ao ar livre, cobertos por uma lona para evitar uma rápida exsudação da água, o que poderia resultar na retração hidráulica e por conseqüência no aparecimento de fissuras nos blocos (fig. 5.12).



Figura 5.10 – Confeção dos blocos (mistura).



Figura 5.11 – Moldagem dos blocos.



Figura 5.12 – Corpos de prova em cura.

5.4. Especificações e Instrumentação dos Tubos

5.4.1. Propriedades Químicas e Mecânicas

Para entender o comportamento dos tubos utilizados na simulação física e facilitar a representação no modelo numérico, foi realizada a caracterização dos mesmos.

A composição química foi obtida junto ao fabricante. O tubo, de latão cromado, apresenta a seguinte proporção entre os materiais constituintes: Cu = 63,17%, Pb = 0,0371%, Fe = 0,0294%, Zn = restante.

As propriedades mecânicas foram obtidas através de 8 ensaios mecânicos destrutivos (ensaios de tração), conforme mostrado na figura 5.13. Destes, 4 foram com o corpo de prova no formato de gravata (CPs 1 a 4) e 4 com o corpo de prova no formato “reto” (CPs 5 a 8) (fig. 5.14). Na tabela 5.3 estão apresentados os resultados destes ensaios.

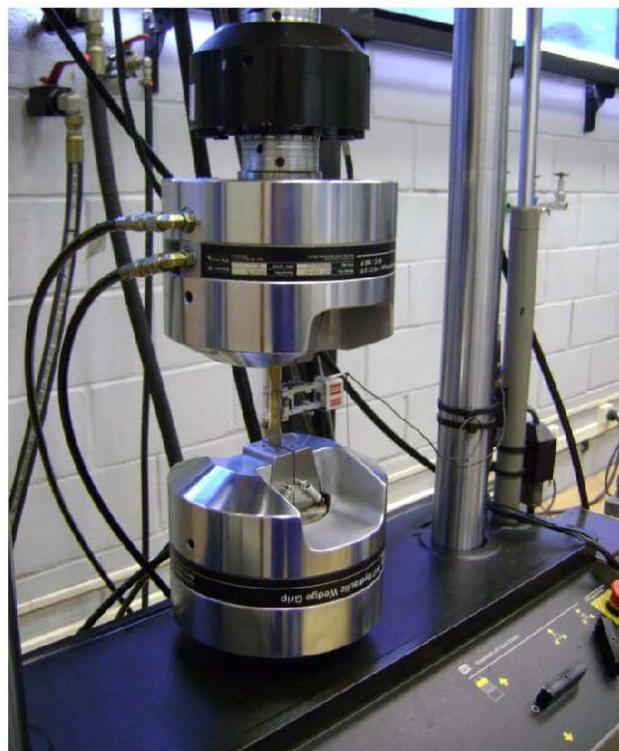


Figura 5.13 – Ensaio de tração do latão.

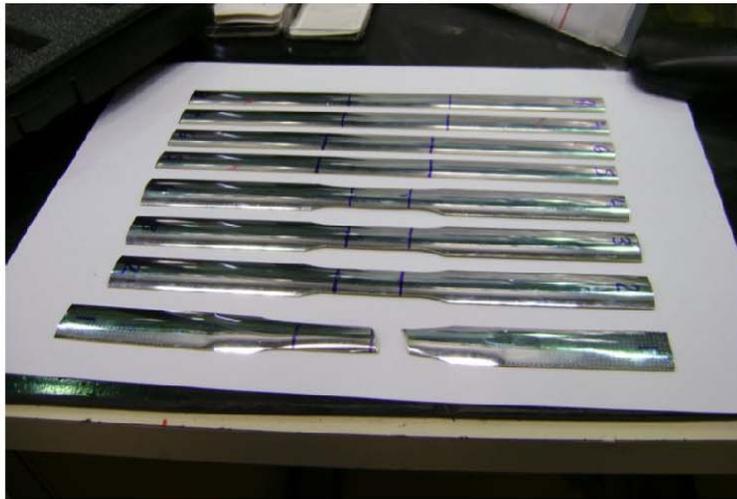


Figura 5.14 – Corpos de prova de latão.

Tabela 5.3 - Ensaio de Tração no Latão - Determinação das Propriedades Mecânicas.

Amostra	Largura (mm)	Espessura (mm)	Lo (mm)	Li (mm)	Along (%)	Tensão Pico (MPa)	Escoamento (MPa)
CP1	12.75	0.52	25.46	28.02	10.00	491.0	454.0
CP2	12.98	0.52	25.25	28.28	12.00	492.0	455.0
CP3	12.77	0.52	25.17	28.17	11.92	531.0	523.0
CP4	12.82	0.52	25.29	26.95	6.56	502.0	494.0
CP5	12.58	0.52	50.92	ERRO	ERRO	---	---
CP6	12.60	0.52	50.11	60.73	?	513.9	502.0
CP7	12.50	0.52	50.36	59.46	18.00	498.5	487.0
CP8	12.60	0.52	50.63	58.79	21.00	514.0	502.0
Σ						3542.4	3417.0
Média						506.1	488.1

A partir dos resultados foi possível determinar a tensão máxima, a tensão de escoamento e o módulo de elasticidade do material (figs. 5.15 e 5.16 e tabela 5.4). O coeficiente de Poisson foi obtido na literatura.

O limite de escoamento do latão é definido pela tensão que corresponde a uma deformação permanente de 0.5%. O módulo de Elasticidade determinado foi 90,64 GPa.

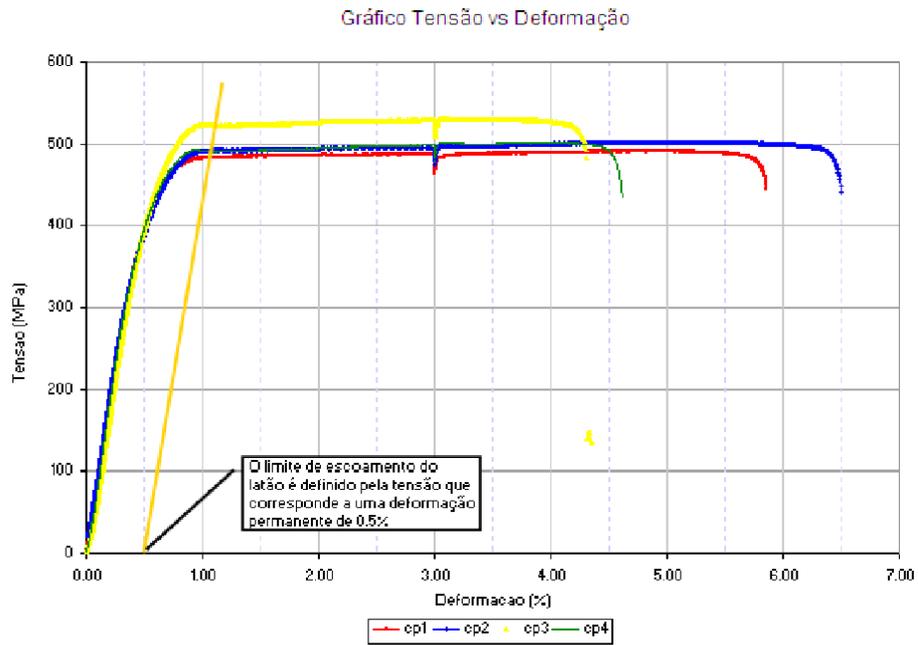


Figura 5.15 – Gráfico Tensão vs. Deformação (CP1 a CP4).

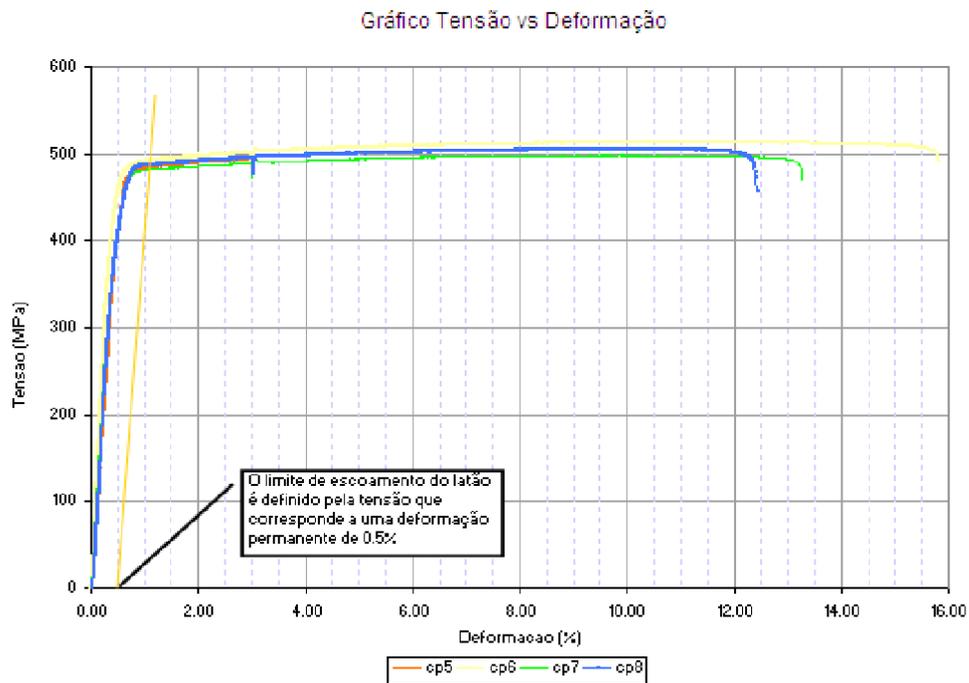


Figura 5.16 – Gráfico Tensão vs. Deformação (CP5 a CP8).

Tabela 5.4 – Propriedades do tubo de latão.

Tensão de Ruptura	491,1	MPa
Escoamento	483,9	MPa
Espessura	0,52	mm
Módulo de Elasticidade	90,64	GPa
Coefficiente de Poisson	0,32	

Além da determinação das propriedades mecânicas, foi realizado um ensaio compressão lateral (fig. 5.17) a fim de se determinar a carga necessária para uma determinada ovalização.



Figura 5.17 – Ensaio de compressão lateral do tubo.

Os resultados foram obtidos de forma indireta: foram medidos tempo, força e deslocamento. A partir do deslocamento, determinou-se a ovalização percentual, dividindo o deslocamento pelo diâmetro inicial e multiplicando por 100. A ovalização percentual máxima permitida neste estudo é de 2%, conforme indicado na figura 5.18.

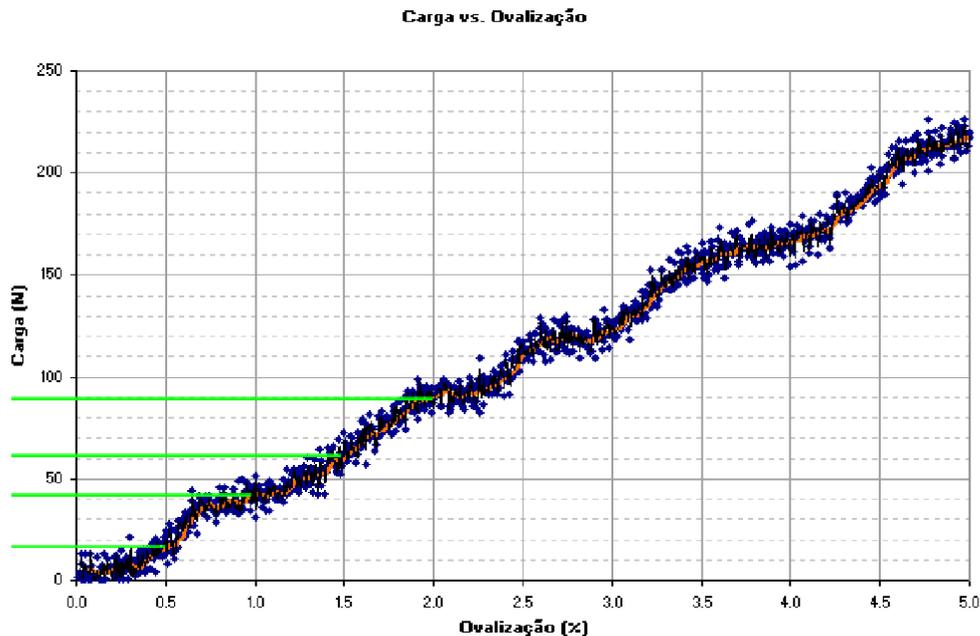


Figura 5.18 – Gráfico Ovalização vs. Carga.

A deformação máxima suportada pelo tubo no regime elástico pode ser obtida da equação $\sigma = E \cdot \varepsilon$.

Sendo $E = 90,64 \text{ GPa}$ e $\sigma = 484 \text{ MPa}$, obtém-se

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \Rightarrow \varepsilon = \frac{484}{90640} = 5,34 \cdot 10^{-3} \text{ strain} = 5340 \text{ microstrain}$$

5.4.2. Medidores de Deformação

Os valores de deformação axial e radial foram medidos através da instrumentação do corpo-de-prova. Para determinar as deformações qualitativas sofridas pelo tubo que representa a tela de contenção em função do campo de tensões, foram utilizados medidores de deformação (*strain gages*). Estes também foram escolhidos levando-se em consideração aspectos econômicos e funcionais.

A convenção da polaridade dos medidores de deformação é positiva para tração e negativa para compressão.

- Estrutura dos medidores de deformação: Existem no mercado muitos tipos de *strain gages*, mas a estrutura geral é composta por uma base de plástico

(com espessura de aproximadamente 15 μm), uma resistência metálica (com espessura entre 3 e 6 μm) e uma lâmina protetora (fig 5.19).

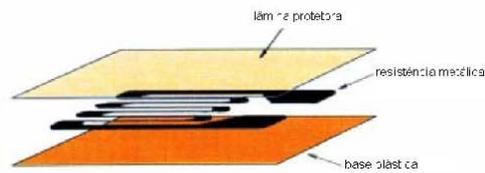


Figura 5.19 – Estrutura dos medidores de deformação (apresentação comercial da Kyowa).

- Princípio de funcionamento: Os sensores devem ser firmemente colados a no objeto a ser medido, dessa forma, a resistência metálica, feita em geral de uma liga níquel-cobre, se contrai ou alonga de acordo com os movimentos do objeto. Quando submetidos a um esforço de tração ou compressão, a maioria dos metais sofre alteração na resistência elétrica. Os *strain gages* utilizam-se do princípio de medir as deformações através dessas mudanças de resistência.
- Medidas de deformação: A leitura das medidas de deformação foi feita utilizando o programa *LabView* e um equipamento da *National Instruments* NI 9162, com 4 canais disponíveis para conectar os *strain gages* (fig. 5.20).

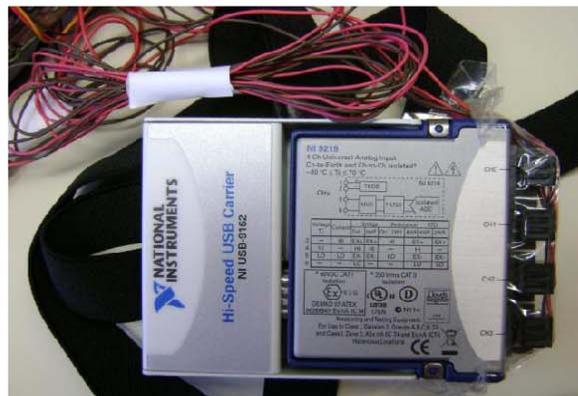


Figura 5.20 – Equipamento utilizado para leitura dos medidores de deformação.

- Características dos medidores de deformação utilizados: Os medidores utilizados, fabricados pela empresa *Kyowa*, são do tipo KFG-5-120-C1-11L1M2R (fig. 5.21), ou seja, são medidores de uso geral (KFG), com 5mm de comprimento (5), 120 Ω de resistência (120), uniaxial (C1), com

coeficiente de expansão linear igual a $11 \cdot 10^{-6} / ^\circ C$ - recomendado para metais (11), sendo o sistema composto por 2 fios (2) encapados de vinil (L) vermelho (R), de 1m de comprimento (1M). A faixa de leitura de deformação definida pelo fabricante é de ± 20 mil micro *strain*.

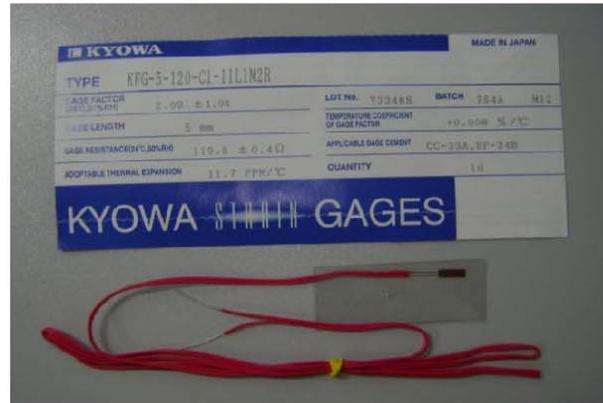


Figura 5.21 – Medidores de deformação utilizados.

No total, foram instrumentados 15 tubos (fig. 5.22). Em cada um deles foram colados 4 medidores, sendo 3 na direção transversal distribuídos pela mesma reta, na direção da tensão vertical e 1 na direção paralela ao eixo do tubo, colado a 180° dos anteriores, conforme mostrado na figura 5.23. Essa escolha levou em consideração as deformações esperadas para o tipo de ensaio. Além disso, para desconsiderar os efeitos de borda (fig. 5.24), os medidores transversais foram colados a $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$ e $\frac{3}{4}$ do comprimento do tubo.



Figura 5.22 – Preparação dos tubos para colagem dos medidores de deformação.

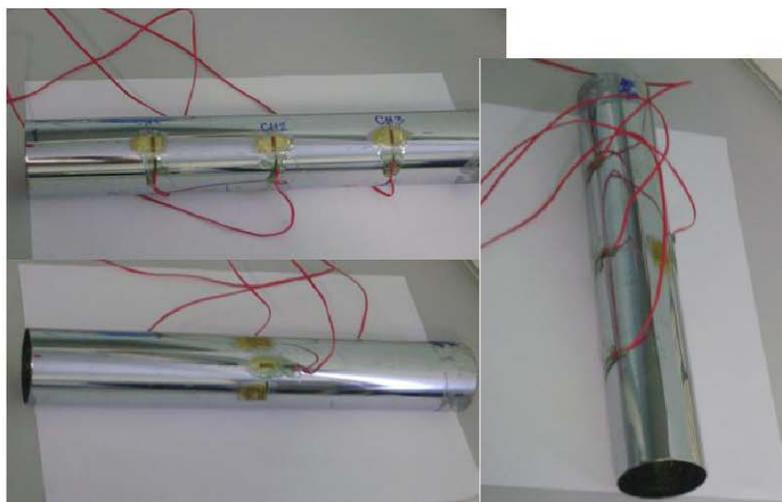


Figura 5.23 – Disposição dos medidores de deformação no tubo.



Figura 5.24 – Efeitos de borda.

5.5. Outras especificações

5.5.1. Interface atuador-cubo

Para minimizar os efeitos de borda provocados pelo contato entre o atuador e o cubo, e melhor distribuir a tensão aplicada na face, pensou-se inicialmente na colocação de folhas de neoprene. No entanto, a idéia foi descartada uma vez que surgiriam forças cortantes, de acordo com a figura 5.25. No lugar do neoprene foram utilizadas folhas de papel cartão (Barbosa, G. – 2008). Para os ensaios onde

as pressões nominais aplicadas alcançaram até 1100 psi aproximadamente, esse efeito foi bastante minimizado.

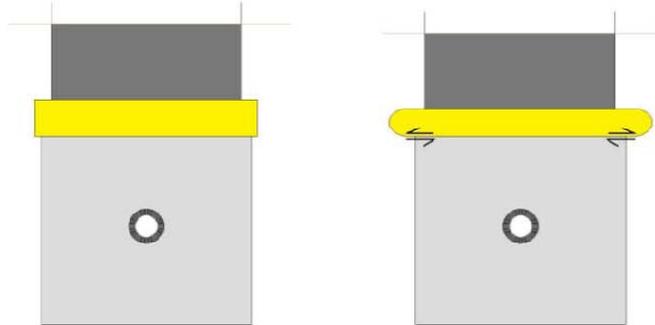


Figura 5.25 – Surgimento de forças cortantes devido à colocação de folhas de neoprene.

Na figura abaixo é possível visualizar as marcas do atuador quando este atua sem nenhum elemento entre as faces (fig. 5.26a), a interface de distribuição de tensões (papel cartão) com as marcas do pistão (fig. 5.26b) e a amostra levemente marcada após ensaio realizado com papel cartão entre o cubo e o atuador (fig. 5.26c)

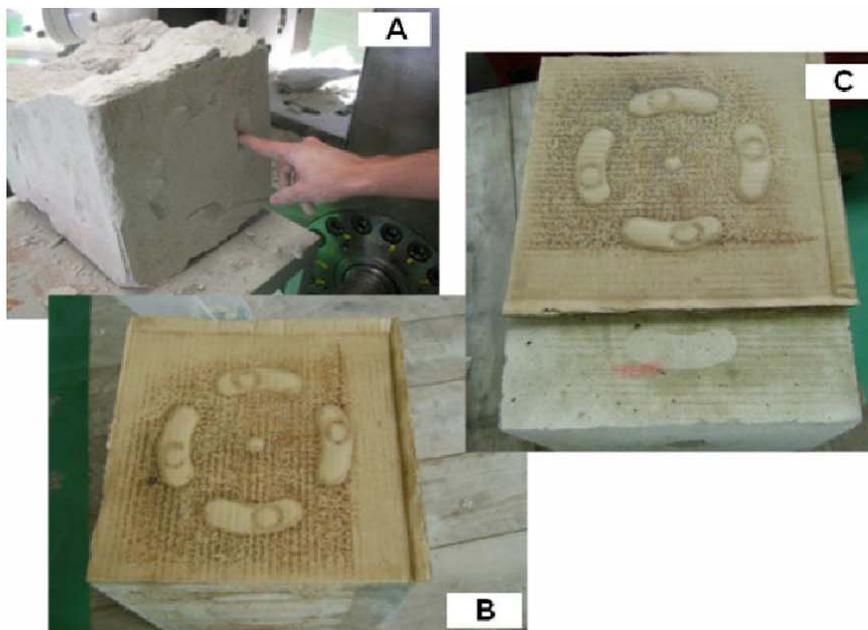


Figura 5.26 – Minimização do efeito do pistão sobre o corpo de prova

5.5.2. Lubrificante

Uma das hipóteses assumidas para o ensaio de amostras é a existência de um estado de tensões uniforme, onde as superfícies carregadas são os planos principais. Entretanto, durante os ensaios de compressão esta hipótese pode não se confirmar, devido ao atrito que ocorre na interface pistão-amostra, resultando numa tensão de cisalhamento.

Para alcançar uma deformação homogênea, foi necessária a utilização de algum elemento que minimizasse os efeitos do atrito. Labuz e Bridell (1993) desenvolveram um estudo no qual compararam quatro tipos de lubrificantes: grafite, dissulfeto de molibdênio, ácido esteárico e folhas de teflon. A escolha destes 4 elementos para realizar o estudo levou em consideração comparações de outros autores.

O lubrificante que apresentou o melhor resultado foi uma mistura de ácido esteárico e vaselina, esta última utilizada para facilitar a aplicação. Para preparar a mistura, colocaram-se em um béquer porções de vaselina e cristais de ácido esteárico na proporção de 1:1 em peso. Estas foram aquecidas lentamente em estufa até a temperatura de 70°C, ponto de liquefação dos cristais de ácido esteárico. Após a amostra estar completamente derretida, a superfície externa do béquer foi resfriada com água fria, para assim diminuir as possibilidades de moléculas de ácido esteárico se separarem da vaselina.

À temperatura ambiente, a mistura tem aspecto uniforme, gorduroso e de coloração branca. Ela foi utilizada para untar a placa e o CP (fig. 5.27). O coeficiente de atrito determinado pelos autores anteriormente citados foi de aproximadamente 0,02.



Figura 5.27 – Atuador sendo untado com a mistura.

5.5.3. Propriedades dos agentes de contenção

O *gravel* utilizado nas operações de *gravel pack* deve apresentar uma esfericidade de 0,6 ou maior e um arredondamento de 0,6 ou maior. Sendo a cerâmica um material sintético, estes critérios são facilmente alcançados.

Neste estudo foi utilizado como *gravel* a cerâmica do tipo *Carbolite*, de dois tamanhos, malha 16/20 e malha 20/40 (fig. 5.28), fornecida pela companhia de serviços BJ. Ambas apresentam densidade absoluta 27,24lb/gal e massa específica aparente 15,66lb/gal. A primeira apresenta permeabilidade 380D, enquanto a segunda apresenta 830D, quando testadas sob as mesmas condições de confinamento (Borges, 2007). A cerâmica adotada possui esfericidade e arredondamento 0,8.

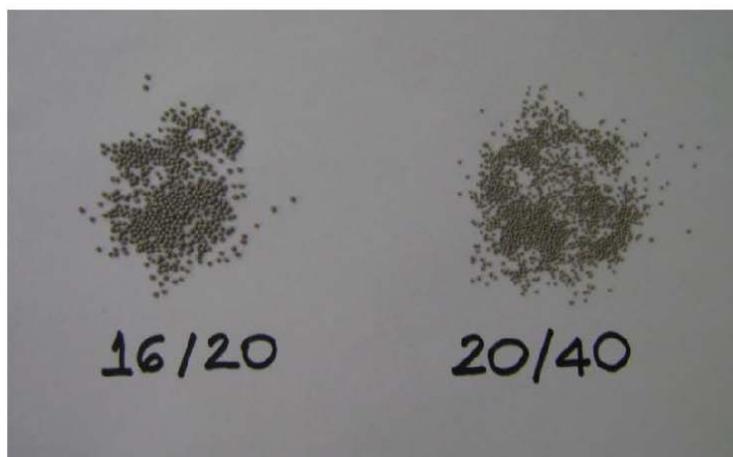


Figura 5.28 – Cerâmica comercial *Carbolite*, malha 16/20 e malha 20/40.

5.5.4. Instalação de Câmera no interior do furo

Para poder visualizar os efeitos ocasionados pelas tensões aplicadas dentro do furo aberto, foi desenvolvido um sistema de filmagem e iluminação por *led*. O sistema, mostrado na figura 5.29, foi protegido por uma carcaça de plástico, feita a partir de garrafas plásticas.



Figura 5.29 – Câmera preparada para o ensaio.

5.5.5. Preparação da Resina e do Gesso

Para fins de comparação dos danos ocorridos dentro do furo aberto e do furo protegido pelo sistema *gravel-tela*, preparou-se uma mistura de resina que foi despejada no furo ao final do ensaio. A resina, do tipo acrílica, foi preparada a partir de uma mistura de resina poliéster transparente 20210 e 1% de catalisador butanox DM-50.

O gesso foi utilizado para revestir o corpo de prova, de forma a assegurar a resina em seu estado líquido no furo (fig. 5.30).



Figura 5.30 – Corpo de prova sendo preparado para colocação da resina

5.6. Casos Estudados

Caso base: furo aberto. O objetivo deste ensaio era entender o mecanismo de ruptura de um poço aberto, em uma formação de baixa resistência sujeita a condições anisotrópicas de tensão. As tensões desviadoras simularam condições de campo, respeitando os limites da formação e do equipamento, e foram aumentadas até o poço ou a formação não suportar mais e ceder. Os valores obtidos para a ruptura serviram de parâmetros para estipular a rotina dos outros ensaios. Antes do início dos testes, o furo foi instrumentado com uma câmera para verificar o início da ruptura e o conseqüente colapso.

Caso 1: furo preenchido com tela centralizada e *gravel* de malha 20/40. O objetivo deste ensaio era verificar as deformações transmitidas à tela em uma situação corrente de *gravel pack*, na mesma formação mencionada, sob as mesmas condições anisotrópicas de tensão. Para medir as deformações, o tubo foi instrumentado com *strain gages*.

Caso 2: furo preenchido com tela encostada na parede e *gravel* de malha 20/40. O objetivo deste ensaio era verificar as deformações transmitidas à tela em uma situação indesejada de instalação do *gravel pack* e comparar com os resultados obtidos no caso corrente.

Caso 3: furo preenchido com tela centralizada e *gravel* de malha 16/20 (fig. 5.31A). O objetivo deste ensaio era verificar as deformações transmitidas à tela em uma situação corrente de *gravel pack*, na mesma formação mencionada, sob as mesmas condições anisotrópicas de tensão, porém, além disso, verificar a influência do diâmetro do *gravel* utilizado.

Caso 4: furo preenchido com tela encostada na parede e *gravel* de malha 16/20 (fig. 5.31B). O objetivo deste ensaio era verificar as deformações transmitidas à tela em uma situação indesejada de instalação do *gravel pack* com a utilização de *gravel* de diâmetro diferente e comparar com os resultados obtidos nos outros casos.

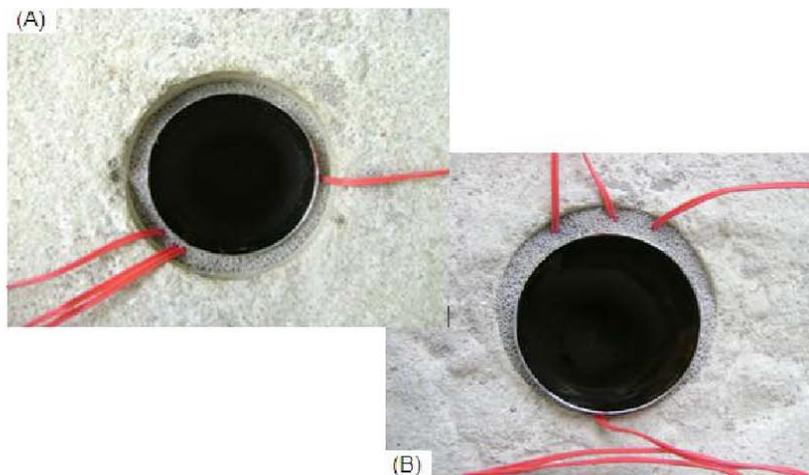


Figura 5.31 – Montagem dos casos 3 (A) e 4 (B).

5.7. Preparação do Ensaio

Os corpos de prova foram preparados na véspera dos ensaios. Foi necessário deixá-los prontos com antecedência, pois cada bateria de ensaios consistia em 5 repetições. Além disso, para instalação da tela e do *gravel* na posição horizontal, foram utilizados papel adesivo, adesivo de silicone e fundo de garrafas plásticas *pet*, necessitando um tempo para secagem. O esquema de preparação contou com os seguintes passos:

1. Os CPs passaram por uma inspeção para verificar o nivelamento das faces, a fim de não surgirem efeitos indesejados (fig. 5.32).



Figura 5.32 – Inspeção dos corpos de prova.

2. Foram cortados fundos de garrafa e quadrados de papel adesivo, utilizados para manter o *gravel* no furo.
3. Foram cortados quadrados de papelão para colocar entre as faces do bloco e os pistões e preparada a mistura de vaselina e ácido esteárico.
4. Nos tubos já instrumentados, foram realizados testes de calibração dos *strain gages* e testes do sistema de aquisição, para saber se este estaria recebendo o sinal corretamente.
5. O papel adesivo foi colado em uma das faces do cubo. Na face oposta, o tubo foi posicionado conforme desejado, lembrando que os *strain gages* transversais deveriam estar alinhados com a vertical. Em uma das extremidades do tubo, marcou-se uma linha vertical para alinhamento do mesmo e para conferir se este sofreu ovalização durante o ensaio (fig. 5.33).

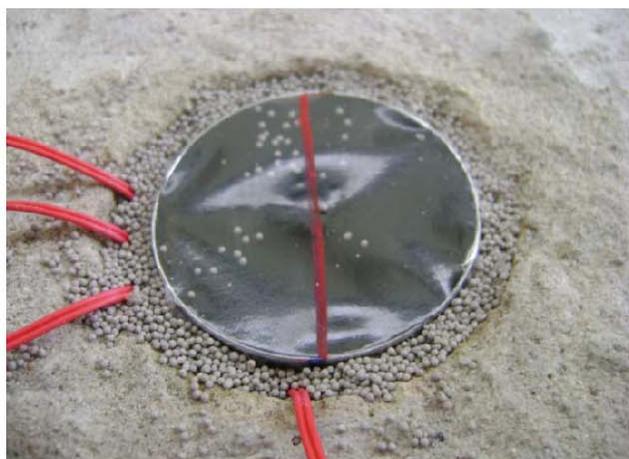


Figura 5.33 – Tubo alinhado.

6. O anular foi preenchido com *gravel* (fig. 5.34). Depois disso, colou-se o fundo de garrafa no furo.



Figura 5.34 – Instalação do sistema *gravel-tela*.

7. Foi separado o material para o ensaio: óleo, cronômetro, luvas, chave de fenda, leitor de *strain gages* e computador.
8. Para os ensaios em furo aberto, também foram separados gesso e resina para os moldes.
9. No dia do ensaio, os sistemas estavam montados do acordo com a figura 5.35.

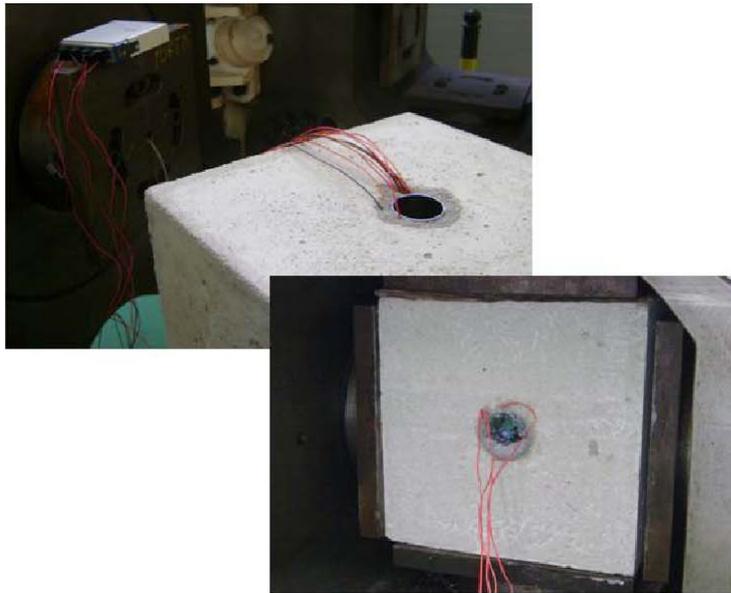


Figura 5.35 – Sistema montado.

5.8. Execução do Ensaio

Para a definição dos estágios de carregamento do ensaio, foi considerada a carga máxima suportada pelo furo aberto. O ensaio foi executado em 12 estágios, considerando as fases de ciclos de carregamento e descarregamento do bloco, o carregamento triaxial, os incrementos axiais e o alívio da pressão (encerramento do ensaio). As pressões estabelecidas correspondem à pressão nominal, lida nos manômetros. O fator de conversão para obter a pressão real atuando nos atuadores é 0,626. Para fins de ensaio foi utilizado como referência a pressão nominal. Abaixo segue a rotina de ensaio.

- **Antes do Início.**
 - a. Calibração dos *strain-gages*.
 - b. Aproximação os pistões.
 - c. Sincronização do relógio do programa com o cronômetro.

- **Fase 1 do ensaio: amostra submetida a carregamento e descarregamento.**
 - a. 0'00" - Carregamento nos 4 pistões (dir y e z) até 200 psi
 - b. 1'00" - Alívio da pressão nos 4 pistões (dir y e z) até 0 psi

- c. 2'00" - Carregamento nos 4 pistões (dir y e z) até 400 psi
 - d. 3'00" - Alívio da pressão nos 4 pistões (dir y e z) até 0 psi
 - e. 4'00" - Carregamento nos 4 pistões (dir y e z) até 600 psi
 - f. 5'00" - Fechamento das duas válvulas em y.
- **Fase 2 do ensaio: amostra submetida a esforços triaxiais.**
- a. 5'30", aumentar 100 psi, passando para 700 psi.
 - b. 6'30", aumentar 100 psi, passando para 800 psi.
 - c. 7'30", aumentar 100 psi, passando para 900 psi.
 - d. 8'30", aumentar 100 psi, passando para 1000 psi.
 - e. 9'30", aumentar 100 psi, passando para 1100 psi.
 - f. 10'30", aumentar 100 psi, passando para 1200 psi.
 - g. 12'30" alívio da pressão e recuo dos pistões.

As figuras 5.36 a 5.38 mostram o ensaio em duas fases: durante o carregamento e após o alívio das pressões.



Figura 5.36 – Ensaio em andamento.



Figura 5.37 – Visão geral do encerramento do ensaio.

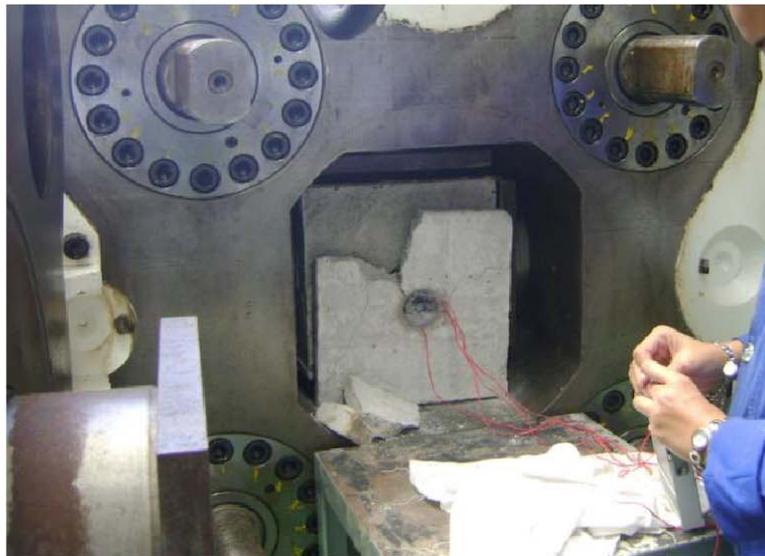


Figura 5.38 – Encerramento do ensaio.