

## 7 Resultados e Discussões

### 7.1.

#### Ensaio executados

##### 7.1.1.

#### Primeiro Teste: Campus da PUC

O primeiro ensaio realizado em campo foi em um maciço rochoso localizado atrás do prédio Cardeal Leme ao lado do DAR (PUC), o objetivo foi avaliar o desempenho dos equipamentos em campo e desenvolver uma metodologia adequada para a execução dos ensaios.

O campus da PUC encontra-se localizado ao pé do morro Dois Irmãos que abrange uma área de 1,8 km<sup>2</sup>, com altitudes de 530 a 440m, representando o limite sul e o contato da Serra Carioca com o oceano.

Nascimento, 1999 fez um estudo e recopilou informação geológica do morro Dois Irmãos.

O controle estrutural deste maciço se faz presente pela existência de um sistema de fraturas regionais de direção E-NE associadas a diques de diabásio, faixas milonitizadas, zonas de falhamento ou fraturamento silicificados.

O Morro Dois irmãos é composto por Gnaiss facoidal sotoposto a uma faixa de biotita gnaiss (kinzigito) com intercalações quartzíticas e xistosidade mergulhando entre 25° e 45° para o SW. O maciço apresenta outras estruturas como falhas normais (N65W/vertical), falhas longitudinais (N60-65E) com fissuramento vertical associado, diques de diabásio, intrusões graníticas e pegmatíticas.

Localmente a rocha constituinte do maciço rochoso é um gnaiss augen de grão fino a médio, composto principalmente por microclina (cristais bem desenvolvidos), e uma matriz fina composta por plagioclásio, biotita, e microclina (baixas quantidades). Um mapa geológico-geotécnico mostrando o local dos ensaios é mostrado na figura 7.1.

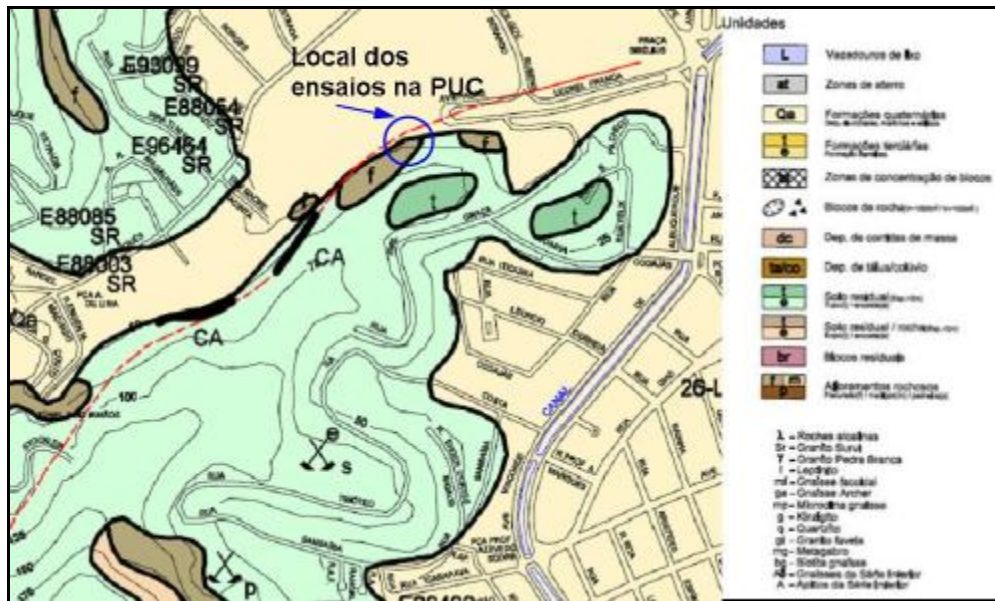


Figura 7.1 – Mapa geológico – geotécnica do local do ensaio na PUC, extraído de Georio, 2007.

O talude da zona do ensaio tem uma altura de 10 a 15 metros aproximadamente, na base do talude se apresentam afloramentos rochosos em diferentes estágios de alteração, alguns deles com cobertura de solo residual, já na parte superior mostram alguns afloramentos um pouco mais alterados, a xistosidade do maciço é bastante pronunciada, fraturas paralelas e subparalelas a xistosidade cortam a rocha.



Figura 7.2 – Vista panorâmica dos taludes onde foram executados os ensaios: (a) ensaios PUC-1, PUC-2, (b) Ensaio PUC-3.

### 7.1.1.1.

#### Primeiro Furo PUC (PUC-1)

A perfuração do furo central foi realizada empregando-se uma perfuratriz rotativa, a profundidade atingida foi de 40 cm e durou cerca de 20 minutos. A pouca resistência oferecida pela rocha produto do processo de intemperismo que esta afetando-la facilitou a perfuração.

Após a execução do furo central, 4 furos ao redor foram executados e 4 pinos foram inseridos a uma profundidade de 25 cm. Para conseguir que os pinos ficassem paralelos um com relação ao outro utilizou-se gabaritos de aço no momento da cravação, para fixar os pinos à rocha utilizou-se um cimentante químico; os gabaritos foram retirados após a secagem do cimentante.

A configuração final dos pinos ao redor do furo central e os gabaritos de aço utilizados são apresentados na figura 7.3.a. a figura 7.3.b mostra o testemunho retirado do furo central.

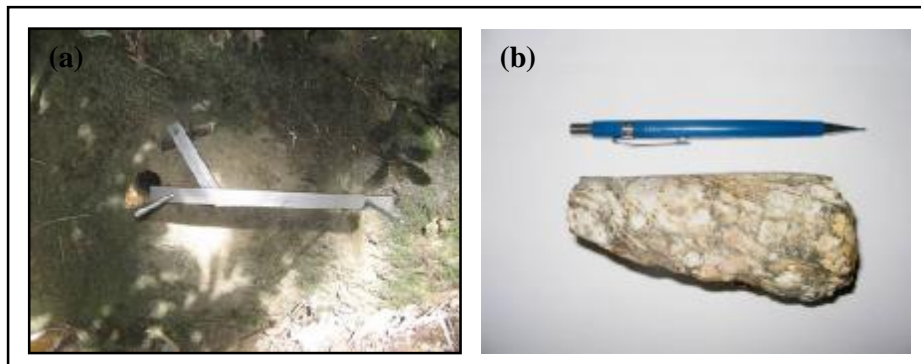


Figura 7.3 – (a) Momento de secagem do cimentante com os gabaritos de aço, (b) amostra obtida como produto da perfuração.

Após a execução dos furos, inserção e fixação dos pinos são montados os LVDT's (ver figura 7.4), seguidamente o pressômetro é inserido iniciando-se o estágio de pressurização. Somente durante este estágio foram monitorados os deslocamentos, sendo que quando a pressão atingida foi de 17 MPa ocorreu uma queda brusca de pressão originada pela geração de uma trinca na rocha (Ver figura 7.4), de mergulho paralelo a xistosidade. Decidiu-se então começar o descarregamento até uma pressão zero.



Figura 7.4 – Trinca gerada na rocha como produto da pressurização do furo.

Durante a execução do ensaio observaram-se os seguintes fatos: os transdutores precisam de um tempo bastante prolongado para a estabilização das leituras (aprox. 30 minutos), falta de estabilidade nas pressões fornecidas pelo macaco, ligeiro entortamento do aparelho para um lado do furo e eficiência dos gabaritos de aço para manter o paralelismo entre os pinos. A figura 7.5 apresenta o procedimento de aplicação/medição de pressão, o sistema de aquisição de dados e o estado do pressiômetro após a realização do ensaio.

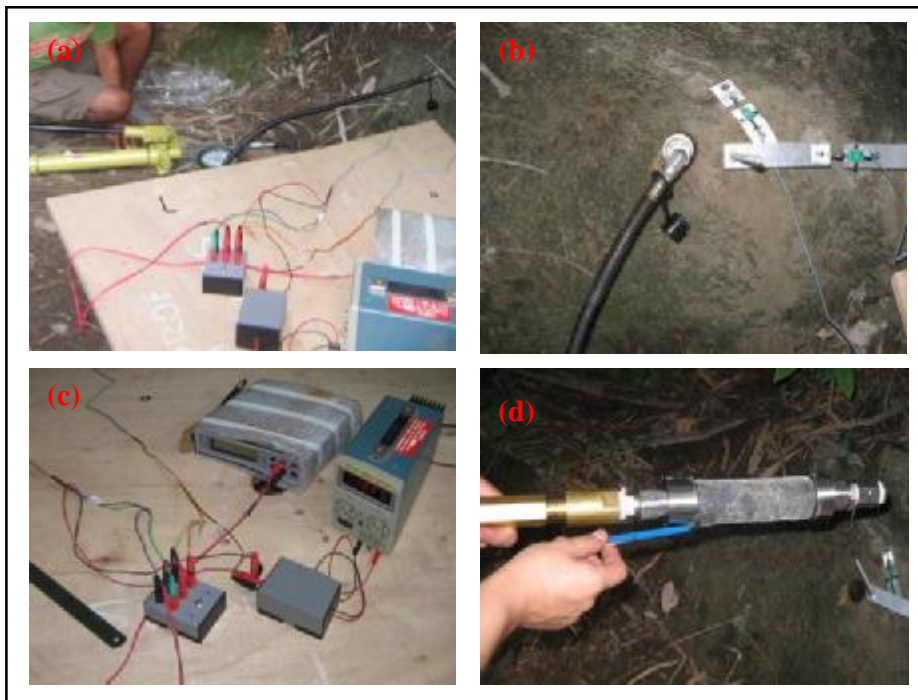


Figura 7.5 – (a), (b) Estágio de pressurização do furo, (c) sistema de instrumentação para medir os deslocamentos gerados, (d) estado da membrana expansível depois da pressurização.

### 7.1.2.

#### **Segundo ensaio: Instituto Pereira Passos (IPP)**

O Instituto Pereira Passos encontra-se localizado na Rua Gago Coutinho, no bairro de Laranjeiras na cidade do Rio de Janeiro, o instituto foi construído nas bases de uma antiga pedreira, onde era extraído material para a construção do aterro de Flamengo. O maciço rochoso onde foram feitos os ensaios está localizado nos fundos do pátio do estacionamento do prédio de 5 andares do instituto. A figura 7.6 apresenta o local de realização e uma vista do maciço ensaiado.

O paredão rochoso, com 90m de altura e 120m de comprimento, é remanescente de uma pedreira desativada. Alinhada no sentido E-W, a escarpa é em quase sua totalidade, com exceção apenas de uma pequena seção com forma convexa (inclinação de 20°) junto ao topo (Britto *et al*, 1999).

A rocha é um gnaisse, chamado de leptinito - microclina gnaisse (Britto *et al*, 1999) finamente laminado.

O maciço rochoso exhibe uma geologia estrutural variada: um sistema de dobras tectônicas deitadas, muito apertadas, com eixo E-W; 3 famílias de fraturas tectônicas subverticais, com atitudes N45E, N40W e N65E; e inúmeras famílias de juntas de alívio de tensão acompanhando a topografia da encosta. Além destes planos, a frente da pedreira mostra ainda um sistema de fraturas imposto pelo plano de fogo com dinamite aplicado durante a escavação (Britto *et al*, 1999).

As dobras tectônicas não estão associadas às descontinuidades. Quanto às outras famílias de juntas, elas apresentam características bastante similares, com pequenas exceções, a saber: o espaçamento das fraturas de alívio (2m) é bem superior ao das demais famílias; a persistência da família de fraturas relacionada ao plano de fogo é muito pequena.

Localmente o leptinito ensaiado apresenta uma coloração gris clara, hololeucocrático, a granulação é de fina a média bandeada e orientada seguindo uma inclinação preferencial, apresenta uma xistosidade muito leve originada pela orientação das biotitas, ao longo do talude podem-se apreciar diques de aplito e alguns veios de quartzo cortando a rocha. O maciço está muito pouco fraturado, apresentando algumas fraturas relacionadas ao plano de fogo. Na figura 7.6 mostra-se um mapa geológico-geotécnico do local do ensaio.

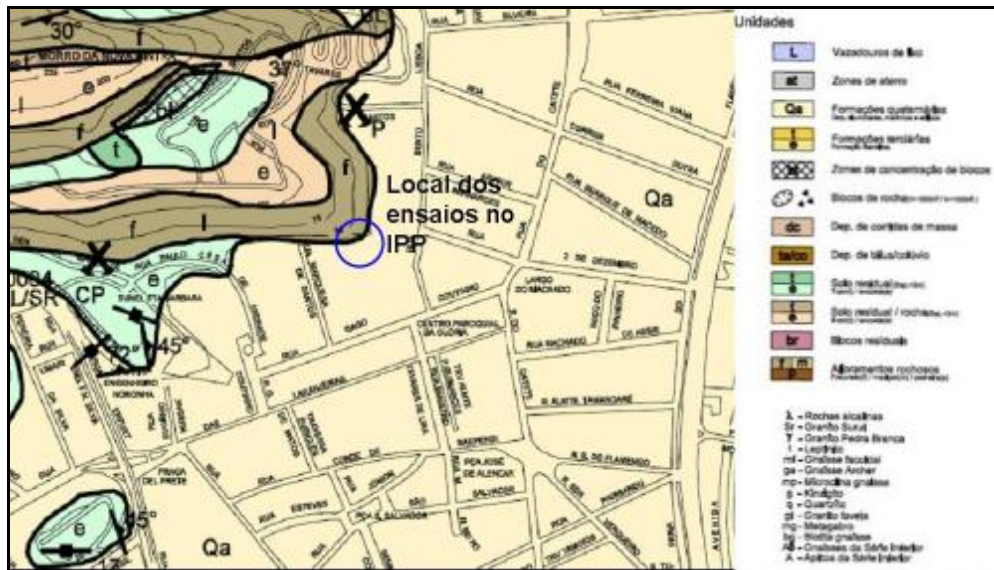


Figura 7.6 – Mapa geológico - geotécnica do local onde foram feitos os ensaios no IPP, extraído do Georio, 2007.

A figura 7.7 apresenta o local de realização e uma vista do maciço ensaiado

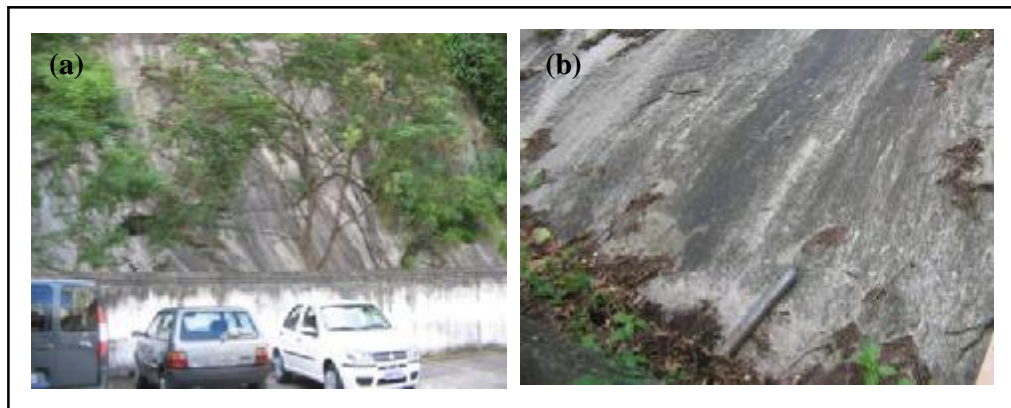


Figura 7.7 – (a) Fundos do pátio do estacionamento do IPP, (b) Vista mais de perto do maciço rochoso.

### 7.1.2.1.

#### Primeiro Furo IPP (IPP-1)

No primeiro furo realizado no IPP foram feitos ensaios de pressurização; o tempo de perfuração demorou aproximadamente 3 horas, perfurando-se no total 40 cm. O monitoramento da pressurização foi feito com dois LVDT's um na posição radial e outro na circunferencial, os pinos foram inseridos a uma profundidade de 25 cm. Para solucionar os problemas de controle de pressão do sistema, encontrados no primeiro ensaio foi incorporada uma válvula de controle de fluxo de óleo para fechar e manter a pressão constante no momento das

leituras. A figura 7.8 apresenta o testemunho retido do furo IPP-1 após a execução do furo central.



Figura 7.8 – Testemunho retirado do furo IPP-1.

Durante a pressurização quando se atingia uma pressão de 22 MPa, ocorreu uma queda repentina de pressão, motivo pelo qual não foi possível se fazer leituras no estágio de descarregamento. O ensaio teve que ser paralisado e após a retirada do equipamento e de uma inspeção visual constatou-se que a membrana não mostrava sinais de dano nem vazamento de óleo. O equipamento foi levado para o laboratório onde foi desmontado para encontrar o motivo da falha do equipamento.

A figura 7.9 apresenta os estágios de realização do ensaio: execução do furo central, execução dos furos pinos, LVDT's instalados, pressiômetro inserido no furo central e o sistema de aplicação/medição de pressão.



Figura 7.9 – (a) Direcionando o furo central, (b) momento da perfuração dos pinos com o martetele, (c) LVDT's montados para o início da pressurização, (d) macaco hidráulico (detalhe da válvula instalada para controlar o fluxo de óleo).

Ao se desmontar no laboratório o pressiômetro verificou-se a quebra do eixo central no extremo que permanece inserido dentro do furo. Foi necessário fabricar outro eixo mais robusto, mais longo e com as paredes mais grossas; modificações feitas para que o equipamento conseguisse suportar as solicitações de pressão necessárias para deformar a rocha. Adicionalmente, foi instalada uma camisa de aço em um dos anéis de fixação, para reforçar esse ponto de fraqueza do equipamento.

Com todas estas medidas corretivas se programou um segundo ensaio de pressurização, os LVDT's foram instalados na mesma posição e iniciou-se a injeção de óleo na membrana. Quando se atingiu 8 MPa os transdutores sofreram uma variação brusca de voltagem, porém a pressões maiores os transdutores não mostraram variação significativa; em 20 MPa os LVDT's ainda não mostravam sinais de mudança de voltagem, já para os 22 MPa, a membrana não suportou a pressão estourando, ocasionando queda de pressão brusca, não sendo possível as leituras do estágio de descarregamento. Observações visuais mostraram a presença de uma fissura no contato entre a membrana e um dos anéis (figura 7.10.c), observações mais detalhadas no laboratório confirmaram esta hipótese. A figura 7.10 apresenta detalhes dos problemas encontrados no pressiômetro.

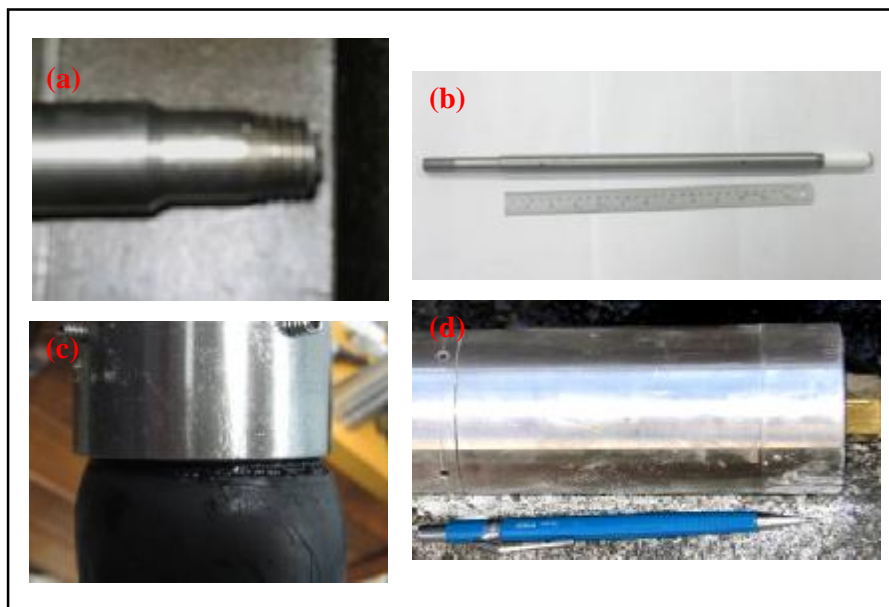


Figura 7.10 – (a) Parte do eixo central quebrado durante o ensaio, (b) Novo modelo do eixo central, (c) fissura gerada no contato anel - membrana, (d) camisa de aço reforçando o equipamento.



### 7.1.2.2.

#### Segundo Furo IPP (IPP-2)

Após os resultados pouco favoráveis no primeiro furo, melhorias na membrana eram necessárias, pois esta não suportava a faixa de pressões necessárias para provocar deslocamentos suficientemente grandes para ser sentidos pelos transdutores. Analisando o comportamento da membrana ao ar e dentro de tubos de aço concluiu-se que o diâmetro da membrana (46 mm) era muito pequeno em comparação com o diâmetro do furo central (60 mm), como resultado era exigido muita expansão para conseguir encostar-se às paredes do furo (quase 30% a mais). Aliás, os testes de pressurização realizados no laboratório mostraram a expansão pouco uniforme da membrana e a geração de tensões cisalhantes no contato anel-membrana quando esta era solicitada a altas pressões. De fato acredita-se ser esse o motivo do arrebentamento da membrana no estágio de pressurização.

Uma nova membrana foi projetada, com diâmetro de 52 mm e 13,3 mm de espessura de parede. Para evitar as tensões cisalhantes observadas entre os anéis e a membrana, esta foi projetada com degraus nas extremidades. Um para o encaixe dos anéis, e outro para o encaixe das roscas e os anéis de fixação.

A figura 7.11 apresenta detalhes da deformação da membrana e o novo modelo projetado.

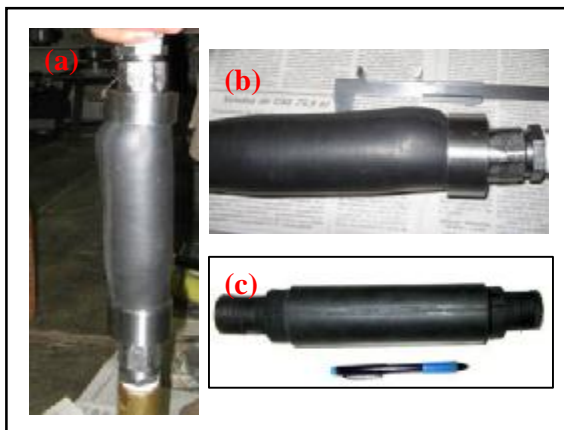


Figura 7.11 – (a), (b) expansão pouco uniforme da membrana ao ar, (c) modelo da nova membrana.

Na execução do segundo furo, programou-se o monitoramento dos deslocamentos produzidos pela perfuração. Para isso, foi necessário ser analisada e desenvolvida uma metodologia de aplicação. Um dos primeiros fatos a ser

considerados no projeto foi o isolamento dos transdutores; o equipamento usado para fazer o furo é um equipamento que usa água como refrigerante e também para ajudar a diminuir o atrito gerado entre a broca diamantada e a rocha; devido à localização dos transdutores perto dos furos, isolá-los era um imperativo. Os LVDT's foram cobertos com camadas de papel filme de PVC transparente, e depois instalados nos suportes.

A perfuração começou às 11h35min da manhã, conforme era executado o furo eram tomadas leituras de voltagem cada dois minutos. A perfuração foi paralisada às 14h5min, até esse momento a profundidade atingida era de 20 cm.

Meia hora após, foi retomada a perfuração, sendo esta continua até às 16h, tempo no qual a broca começou a dar sinais de desgaste diminuindo a velocidade de perfuração e ocasionando forte aquecimento do motor da esmerilhadeira. Optou-se por paralisar a perfuração para evitar o sobreaquecimento, porém contínuo-se fazendo leituras até a estabilização completa da voltagem, o tempo total de perfuração foi de 5 horas atingindo-se uma profundidade de 27 cm. As figuras 7.12 e 7.13 apresentam detalhes da execução do ensaio.

O desempenho da broca diamantada usada nos ensaios realizados não foi, de uma forma geral, satisfatório, pois não mostrou a mesma efetividade mostrada em rochas mais brandas, o tempo de avance por centímetro de perfuração foi lento, além da pouca durabilidade (em conjunto a perfuração total da broca foi de 1.13 m).



Figura 7.12 – (a) Momento de secagem do cimentante químico, (b) disposição dos LVDT's ao redor do furo IPP-2, (c) detalhe do LVDT protegido com filme de PVC transparente, (d) instrumentação para medição dos deslocamentos.

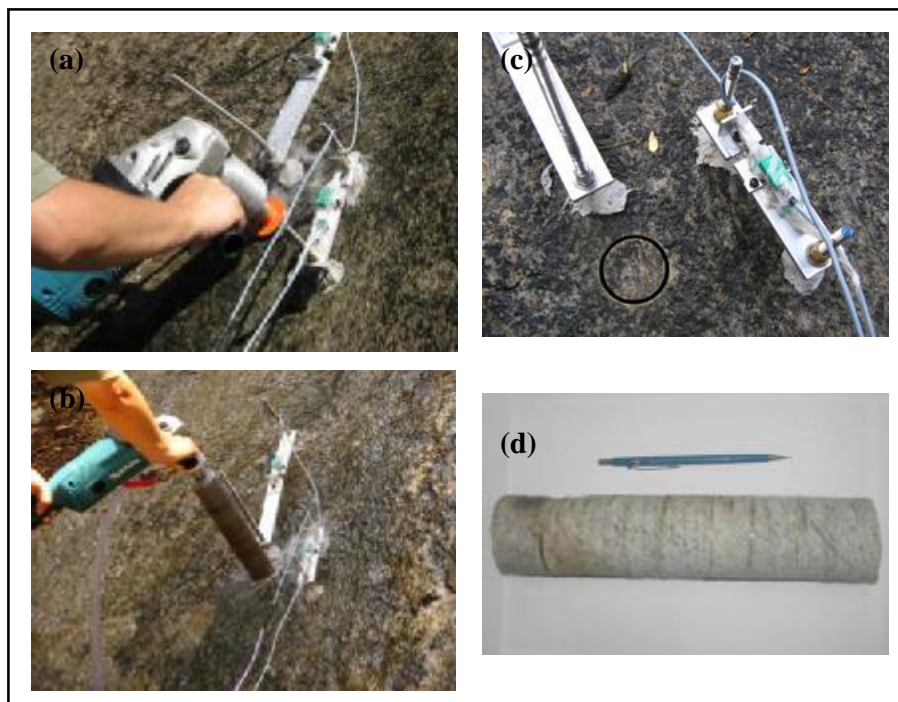


Figura 7.13 – (a) Início da perfuração do furo central com a broca de 50 mm, (b) monitoramento da rocha no momento da perfuração, (c) estado dos LVDTs depois da perfuração, (d) testemunho de rocha obtida da perfuração

### 7.1.2.3.

#### Terceiro Furo IPP (IPP- 3)

Devido aos problemas encontrados com a broca, encomendou-se ao fabricante (J. Moraes Máquinas), elaborar uma broca mais acorde com a dureza da rocha motivo do ensaio. Assim de acordo com as indicações dadas pela empresa à nova broca apresenta uma quantidade maior de diamante nos bordos além de uma maior espessura do anel da coroa para permitir uma maior resistência ao atrito gerado no contato com a rocha.

Sendo assim ia ser inviável usar o furo anterior que ficou pela metade, porquanto existiam diferenças de diâmetro entre o furo feito e o diâmetro interno da broca.

Um detalhe observado no ensaio anterior foi que proteger as camadas com papel filme de PVC não era suficiente para isolar os LVDT's uma vês que terminada a perfuração e revisados os sensores, estes encontraram-se úmidos e com gotas de água na superfície; concluindo-se então que ia ser necessário adotar medidas adicionais de proteção nos próximos ensaios.

No terceiro furo programado ademais das modificações já mencionadas foram feitas as seguintes inovações para melhorar a metodologia de execução:

- Cobertores plásticos de proteção para os transdutores contra os efeitos da água, além de envolver os LVDT's com mais camadas que as colocadas no ensaio anterior.
- Adição de mais dois transdutores: um circunferencial e outro radial para ter uma maior quantidade de medidas e conseguir medir deslocamentos em mais duas direções.
- A caixa seletora desenhada para dois LVDTS foi trocada por outra com seis canais de capacidade de leitura.

A figura 7.14 mostra detalhes da execução do ensaio IPP-3.



Figura 7.14 – (a) Disposição dos LVDTs no furo IPP-3, (b) protetores plásticos cobrindo todo o sistema de monitoramento dos deslocamentos, (c) momento da perfuração, detalhe da água espirrando sobre os protetores plásticos, (d) caixa seletora usada neste ensaio.

Com exceção dos plásticos protetores cobrindo os LVDTs, os quais são colocados depois de terminada a montagem dos pinos e antes de começar a execução do furo central, foi seguido o mesmo procedimento de execução que o furo anterior. A profundidade total atingida foi de 40 cm num tempo aproximado de perfuração de 3 h. Infelizmente a broca diamantada não teve o comportamento esperado, o tempo de perfuração foi o mesmo que a broca anterior e não se lograram progressos na velocidade de perfuração; em linhas gerais não se observou melhoras na performance da broca. A figura 7.15.a apresenta o testemunho extraído deste furo.

Foram feitos 3 ensaios de pressurização, atingindo-se pressões de 20 a 25 MPa, na terceira pressurização, no segundo estágio de carregamento e quando estavam sendo aplicadas pressões de 20 MPa, a membrana arrebentou bruscamente, ocasionando vazamento de óleo dentro do furo, interrompendo o ensaio, motivo pelo qual foi dado por concluído. A forma como ficou o pressiômetro depois do ensaio é mostrada na figura 7.15.b.

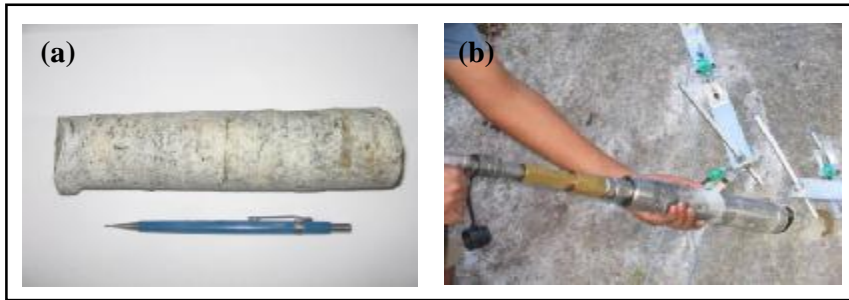


Figura 7.15 – (a) Parte do testemunho de rocha obtida no terceiro furo do IPP (IPP-3), (b) momento da inserção do pressiômetro dentro do furo.

Os primeiros sinais de vazamento de óleo indicavam que tinha acontecido uma ruptura da membrana, porém, nas revisões preliminares, não se encontraram sinais de deteriorização ou de algum tipo de fissura, pelo que provavelmente a ruptura devia ser interna.

Quando o equipamento foi desmontado, a fissura foi localizada no contato entre a membrana e o anel, aparentemente a expansão da membrana durante os acréscimos de pressão estava ocasionando tensões de cisalhamento, o mesmo problema que foi detectado no projeto da membrana anterior, portanto o novo modelo não solucionou o problema da ruptura por cisalhamento gerado pelas altas pressões aplicadas. A figura 7.16 mostra detalhes dos bordos da membrana.

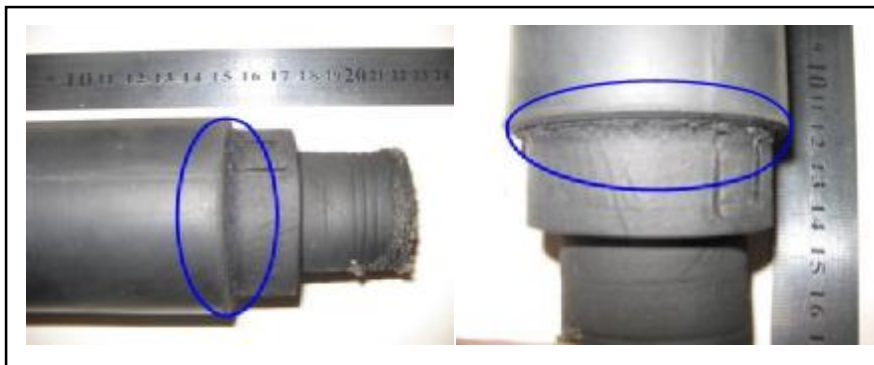


Figura 7.16 – Detalhe da fissura, bordos e degraus da membrana.

O modelo da membrana teve que ser novamente reformulado; uma das prioridades levadas em conta no novo projeto foi eliminar os degraus porque estes não estavam ajudando ao bom desempenho da mesma.

Os degraus foram trocados por bordos cônicos de  $32^\circ$  de inclinação, teoricamente os bordos cônicos eliminariam o efeito de cisalhamento, e faria que este ponto de fraqueza tornasse mais robusto e resistente. A modificação no projeto da membrana causou também modificação dos anéis fixadores, o diâmetro

interno dos anéis foi reprojetoado com borda interna cônica, para permitir o acoplamento com a membrana.

### 7.1.3.

#### Terceiro ensaio: Campus da PUC

##### 7.1.3.1.

#### Segundo Furo PUC (PUC-2) - Local A

O segundo furo foi realizado no mesmo horizonte rochoso do primeiro ensaio, a metodologia de execução foi a mesma, os pinos foram inseridos com 25 cm. da superfície da rocha, e a profundidade do eixo central foi de 40 cm.

Além dos quatro transdutores já utilizados em ensaios anteriores, foram adicionados mais dois, um radial e outro circunferencial, totalizando seis: três radiais e três circunferenciais. O arranjo final dos LVDT's é apresentado na figura 7.17.

Somente foram medidos os deslocamentos na etapa de pressurização realizando-se três pressurizações em estágios de carregamento e descarregamento, em linhas gerais a membrana funcionou sem inconvenientes, confirmando-se que a pressões baixas o comportamento da membrana é aceitável.

No terceiro estágio de pressurização e com uma pressão aplicada de 6,25 MPa aconteceu um fissuramento da rocha, paralela ao plano de xistosidade. A figura 7.18 mostra o fissuramento ocorrido.

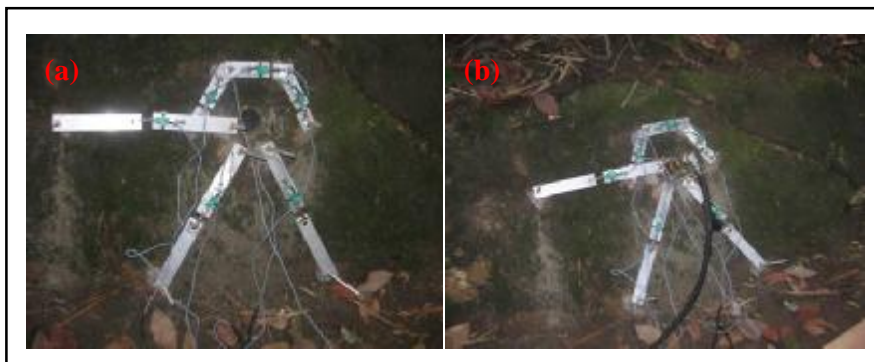


Figura 7.17 – (a) Disposição dos LVDTs ao redor do segundo furo realizado na P.U.C (PUC-2), (b) início da pressurização do furo PUC-2.



Figura 7.18 – Trinca gerada no momento da pressurização do furo PUC-2.

Analizadas as curvas de pressão – deslocamento do ultimo ensaio executado (PUC-2) novamente aconteceu um fato que se pensava era um problema de sensibilidade dos transdutores e da faixa de deslocamento. Um ponto comum presente em todos os ensaios de pressurização feitos até esse momento mostravam deslocamentos de alongamento entre os pinos radiais, efeito que discorda das previsões de deslocamentos feitas em base à solução de Kirsch que dava como resultado encurtamento entre pinos radiais no estagio de pressurização do furo.

Já que este problema aconteceu também no ensaio executado no local A (ensaio PUC-2) que é um maciço rochoso afetado por diversos graus de intemperismo sendo, por tanto, rochas mais brandas, onde os deslocamentos produzidos iam a estar dentro de uma faixa maior de deslocamentos, e teoricamente os sensores tenderiam a suficiente sensibilidade para registrá-os, concluiu-se que possivelmente o problema esteja no esquema usado para a medição de deslocamentos.

Logo após uma análise das possíveis causas deste fenômeno, determinou-se que pela forma da membrana e por efeito da deformação da mesma (a deformação no momento da expansão é menor nos extremos e maior no centro), os pinos estavam se alongando no lugar de se encurtar quando era aplicada pressão dentro do sistema.

Uma representação gráfica deste comportamento é mostrada na figura 7.19



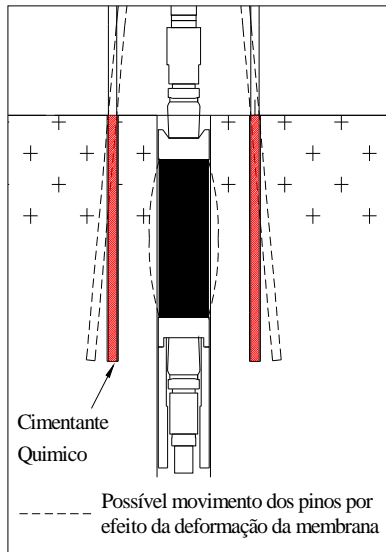


Figura 7.19 – Esquema que mostra o possível comportamento dos pinos por efeito da deformação da membrana.

Como originalmente o pressiômetro era introduzido dentro do furo até uma profundidade em que a metade da membrana ficasse na mesma profundidade que a parte média dos pinos. Esta disposição inicial foi mudada para a seguinte configuração: a membrana foi inserida até uma profundidade em que o bordo do anel fixador coincida com o bordo do furo. Os pinos foram inseridos a uma profundidade de 5 cm mais embaixo da profundidade a que se encontrava a metade da membrana e o cimentante químico para a fixação dos pinos somente foi colocado nos primeiros 10 cm (contando desde o fundo do furo). Na figura 7.20 é mostrado o novo projeto com as modificações feitas e o comportamento esperado dos pinos dentro do furo.

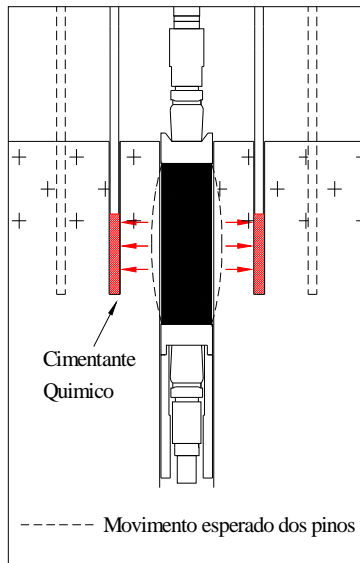


Figura 7.20 – Projeto do novo esquema adotado e o comportamento esperado dos pinos dentro do furo.

### 7.1.3.2.

#### Terceiro Furo PUC (PUC – 3) - Local B

O ensaio foi feito no mesmo maciço rochoso que o local A onde foi executado o segundo furo, mas nesta parte a rocha se encontra atravessando uma fase de alteração mais avançada.

A profundidade de inserção dos pinos foi seguindo o novo esquema (mostrado na figura 7.20). A execução do furo central começou às 10h45min, levando aproximadamente 1h com a execução completa dos 40 cm. Foram feitas duas paradas, a primeira quando foi atingida uma profundidade de 27 cm, aqui os sensores mostraram uma ligeira mudança de voltagem a qual com o passar do tempo foi lentamente se estabilizando. Posteriormente foi retomada a perfuração até completar os 40 cm, momento no qual foi definitivamente paralisada e novamente foram feitas leituras de voltagem até atingir a estabilização dos sensores.

Na etapa de pressurização foram realizados dois ensaios em estágios de carregamento e descarregamento, o incremento de pressões foi executado em intervalos pequenos, pois mesmo sob pressões baixas os deslocamentos eram bastante significativos, tentando-se evitar o fisuramento do maciço. A figura 7.21 mostra detalhes da execução do ensaio PUC-3.



Figura 7.21 – (a) Disposição dos LVDT's no furo PUC-3, (b) protetores plásticos cobrindo todo o sistema de monitoramento dos deslocamentos, (c) Perfuração do furo central, (d) estágio de pressurização.

Observando-se os valores de deslocamentos (encurtamento) obtidos nos LVDT's radiais, os quais serão mostrados nas seções seguintes, valida-se o novo esquema de montagem.

## 7.2.Resultados

### 7.2.1.

#### Medição das Tensões “in situ”

Hees (1996) foi o primeiro em realizar ensaios de Tensão *in situ* em Rio de Janeiro utilizando a técnica do *Doorstopper* modificada. O local do ensaio foi no Morro Dona Marta, localizado entre os bairros de Laranjeiras, Cosme Velho e Botafogo, na região sul do Rio de Janeiro. No ensaio foram executados um total de 3 furos, executados de maneira divergente.

O modelo de interpretação adotado pelo autor foi considerando o maciço rochoso elástico, linear e transversalmente isotrópico. Os parâmetros elásticos foram determinados através da realização de ensaios de laboratório: ensaio de compressão biaxial isotópica para a obtenção dos módulos de elasticidade, e o ensaio de compressão diametral para obter o coeficiente de Poisson e o módulo de cisalhamento.

Na tabela 7.1 são apresentados os resultados das magnitudes e orientações das tensões principais encontradas.

Tabela 7.1 – Magnitude e orientação das tensões principais obtidas no morro Dona Marta; Hees (1996).

Tensões Principais	
Magnitude (MPa)	Orientação (Direção/Mergulho)
$\sigma_1 = 5,90$	242/49
$\sigma_2 = 2,89$	330/-2
$\sigma_3 = 0,06$	58/41

Na análise dos dados, Hess (1996), compara os resultados obtidos, e os esperados de acordo com a teoria das tensões litostáticas, ele comenta que a diferença de cotas entre o ponto mais alto do Morro Dona Marta e o local da realização das medidas, é de 250m, considerando a hipótese de um maciço isotrópico, com  $g = 0.027$  MPa/m, sem o efeito da topografia, ou seja, com uma topografia horizontal, para um ponto situado a 250 m de profundidade, seriam encontradas tensões verticais em torno de 6,5 MPa, que comparando com a tensão principal maior encontrada (5,9 MPa) pode ser que esta seja um efeito preponderante da superfície topográfica atual.

Na metodologia usada nesta pesquisa para obter as tensões *in situ* devem ser medidos os deslocamentos ou deformações produzidas pela relaxação da rocha como consequência da perfuração (solicitação de descarregamento do maciço).

Em comparação com os deslocamentos produzidos no estágio de pressurização, os deslocamentos produzidos pela relaxação da rocha estão numa faixa menor, devendo, por tanto, os transdutores serem muito sensíveis e seu grau de precisão deve ser bastante alto.

### 7.2.1.1.

#### Instituto Pereira Passos - Segundo Furo (IPP-2)

Uma das primeiras tentativas para a medição de deslocamentos no estágio da perfuração foi realizada no segundo furo perfurado no IPP, o maciço rochoso está intacto e pouco ou nada afetado pelos agentes intempéricos.

A disposição dos LVDTs foi um na direção radial fazendo um ângulo  $\theta = 120^\circ$  (S2) com relação ao eixo  $x$  e outro na direção circunferencial fazendo também  $\theta = 120^\circ$  (S2) com o eixo  $x$ , conforme figura 7.22. Os deslocamentos obtidos durante e após a perfuração são mostrados na forma gráfica na figura 7.23.



Figura 7.22 – Disposição dos LVDTs no furo IPP-2.

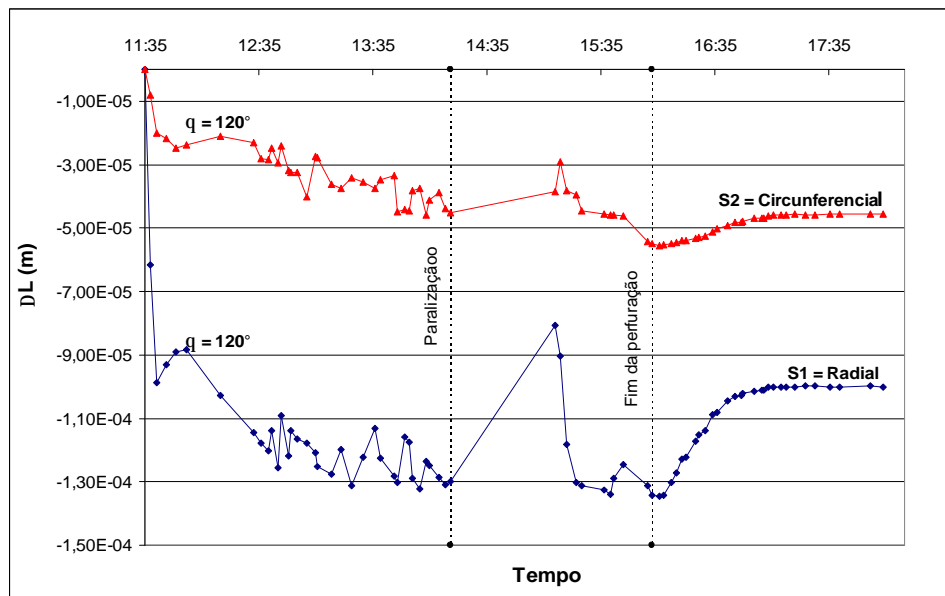


Figura 7.23 – Deslocamentos obtidos durante e após a perfuração (ensaio IPP-2).

Os primeiros tramos da curva correspondem aos deslocamentos produzidos na rocha pela perfuração, estas leituras são influenciadas pelas vibrações dos equipamentos, dada a intermitência nas leituras, no entanto a curva como um conjunto mostra certa tendência. Há duas mudanças bruscas na disposição das curvas que têm sido diferenciadas no gráfico com linhas descontínuas, a primeira corresponde a uma paralisação ocorrida para controle dos equipamentos, e a segunda que mostra o momento do fim da perfuração, aparentemente estas curvas corresponderiam à etapa de relaxação da rocha produzida pelos efeitos de descarregamento.

Analisando as curvas obtidas, observa-se que o deslocamento radial é maior que o circunferencial. Dado que os pinos circunferenciais encontram-se mais perto do furo, esperava-se que os deslocamentos radiais fossem maiores.

O alongamento ou encurtamento dos pinos teoricamente depende: de  $j$  (ângulo entre a tensão principal major e o eixo  $x$ ), das magnitudes das tensões principais e das propriedades mecânicas do material ( $E$ ,  $\nu$ ). Porém os dois sensores monitoraram deslocamentos negativos (alongamentos), que no caso dos sensores circunferenciais discorda das simulações realizadas com base a solução de Kirsch, que indicava encurtamento entre pinos circunferenciais.

Observa-se ainda dos dados coletados que o tempo gasto para a estabilização indica que os deslocamentos produzidos não foram instantâneos senão que foram se incrementando com o transcorrer do tempo, o que indicaria um muito possível comportamento viscoelástico da rocha. Este fato é bastante discutível, posto que esse tipo de comportamento é mais comum em foelhos e filitos, e rara vez acontece em rochas gnáissicas salvo em algumas situações particulares (Goodman, 1989).

Para se realizar uma retro-análise do ensaio são necessárias no mínimo três medidas de deslocamentos (três incógnitas no problema de minimização  $s$ ,  $t$ ,  $P$ , equação 4.19), por tanto não foi possível realizar os cálculos para a reconstrução do estado de tensões.

Por conseguinte esse ensaio serviu para conhecer alguns fatos do ensaio: saber se os transdutores utilizados eram o suficientemente sensíveis para medir a faixa de deslocamentos da relaxação da rocha considerando que as curvas produzidas sejam efetivamente do material, se a água afetaria o desempenho dos transdutores, e se a vibração produzida pelos equipamentos (esmerilhadeira e brocas diamantadas) afetaria às leituras.

#### **7.2.1.2.**

#### **Instituto Pereira Passos - Terceiro Furo (IPP-3)**

Este furo foi realizado a poucos metros de distância do segundo furo, as leituras foram feitas com 4 LVDT's dispostos conforme indica a figura 7.24.



Figura 7.24 – Disposição dos LVDT's no furo IPP-3.

Os resultados obtidos neste ensaio são mostrados na figura 7.25. As curvas obtidas diferem bastante das curvas do ensaio anterior; principalmente na resposta da rocha aos efeitos de descarregamento.

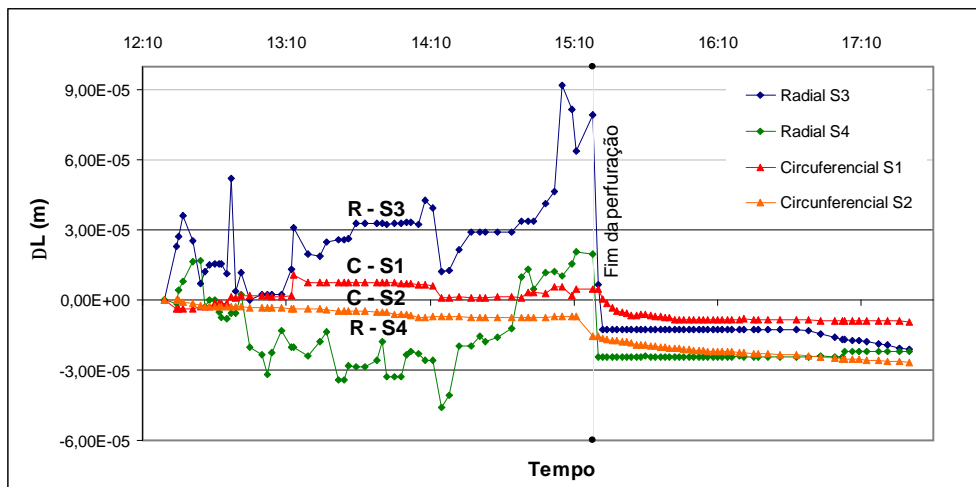


Figura 7.25 – Deslocamentos obtidos durante e após a perfuração (ensaio IPP-2).

Esta diferença de comportamento é observável, considerando que o maciço rochoso é o mesmo, portanto o comportamento entre os dois ensaios devia ser pelo menos similar.

Analisando-se o gráfico obtido devem ser diferenciados dois tipos de comportamento: o comportamento dos transdutores circunferenciais e dos radiais. As curvas circunferenciais ao igual que no ensaio anterior apresentam deslocamentos que variam com relação ao tempo; as curvas radiais apresentam um comportamento diferente, pois a variação de deslocamentos é instantânea, acontecendo uma queda de valores os quais vão se fazendo constantes após certo período de tempo. Outra diferença é a variação do sentido dos deslocamentos, começando com encurtamento nos primeiros estágios, virando alongamento nos tramos finais.

Deve-se observar que a faixa de deslocamentos registrado pelos transdutores; considerando os altos valores de pressão que foram requeridos na fase de pressurização para provocar deslocamentos que pudessem ser sentidos pelos transdutores, era esperada menor na fase de relaxação da rocha. Os deslocamentos registrados são bastante elevados para uma rocha sã com pouco fraturamento.

Os dados obtidos no ensaio foram utilizados para realizar a retro-análise. O primeiro passo para o procedimento de cálculo foi a obtenção do módulo cisalhante  $G$  a partir dos dados obtidos na fase de pressurização (a metodologia de cálculo será tratada com detalhe na seção seguinte), seguidamente e conhecendo-se o valor do módulo  $G$ , procedeu-se com a etapa de cálculo das tensões. A minimização foi feita analiticamente em linguagem MAPLE empregando-se o método dos mínimos quadrados, seguindo as equações formuladas na seção 4.3.

Foram feitas duas tentativas para resolver a minimização: a primeira tentativa foi utilizar os quatro valores de deslocamento registrados em campo; os valores das tensões obtidos mostraram uma incoerência física, pois o valor de  $\sigma_1$  se apresentou menor que o valor de  $\sigma_2$ , numa faixa de valores da ordem de 30 - 40 MPa. Magnitudes elevadas si se compara com a faixa de valores encontrados por Hees, (1996) (Ver tabela 7.1) para os leptinitos do Morro Dona Marta, fazendo um cálculo da tensão vertical atuante no maciço em base à hipótese das tensões gravitacionais, com  $z = 90$  m (altura do talude) e  $g = 0,0027$  MPa/m (peso específico da rocha), o valor esperado de  $\sigma_v$  estaria dentro da ordem de grandeza de 2,43 MPa, concluindo-se então a partir destas comparações que os valores obtidos não representam o estado de tensões atuantes no maciço.

Na segunda tentativa de cálculo foi eliminado um valor de deslocamento. Levando-se em conta que os LVDT's radiais registraram valores de deslocamentos concordantes com a teoria de Kirsch (isto é, alongamento das distâncias entre os pinos na fase de relaxação da rocha) e os circunferenciais não (esperava-se um encurtamento das distâncias entre pinos) decidiu-se eliminar um dos valores de deslocamentos circunferenciais, já que teoricamente só seriam necessárias três medidas de deslocamentos (três incógnitas no problema de minimização). Os resultados obtidos na segunda tentativa tiveram a mesma



tendência que a primeira (magnitude de  $\sigma_2$  maior que  $\sigma_1$ ) sendo a faixa de valores maior, concluindo-se então a pouca confiabilidade dos valores obtidos no ensaio.

### 7.2.1.3.

#### PUC - Terceiro furo (PUC-3) Local B

A disposição dos LVDTs usada neste ensaio é mostrada na figura 7.26.



Figura 7.26 – Disposição dos LVDT's no furo PUC-3.

A principal diferença entre este ensaio com os anteriores é a quantidade de transdutores usados para a medição dos deslocamentos, 6 no total, três circunferenciais e três radiais. Neste ensaio foram feitas duas paradas, na primeira quando foi atingida uma profundidade de 27 cm. e a segunda quando foi atingida uma profundidade de 40 cm. que foi a profundidade projetada do furo.

No caso dos transdutores radiais (ver figura 7.27), no LVDT S5  $\theta = 300^\circ$  os deslocamentos são de encurtamento a curva mostra um pico e os valores vão descendo gradualmente até a estabilização. Para o S4  $\theta = 240^\circ$  a curva é côncava, os deslocamentos produzidos são de alongamento entre pinos. Aparentemente o LVDT S3  $\theta = 180^\circ$  não percebeu nenhuma mudança de distâncias entre pinos já que mostra uma curva com comportamento linear, este fato pode ser explicado por dois motivos, o primeiro considerando a anisotropia da rocha, pode-se especular que os deslocamentos foram muito pequenos para ser percebidos pelo sensor, a segunda hipótese seria uma montagem deficiente do LVDT que teria impedido um bom funcionamento do transdutor.

No gráfico de deslocamentos circunferenciais (figura 7. 28) as três curvas se comportam de maneira diferente, uma delas, a correspondente ao LVDT S1 é a que apresenta um comportamento particular, pois na primeira parada (27 cm. de profundidade) mostra alongamento da rocha, e no final do furo, muda de comportamento para encurtamento. Os outros dois LVDT's circunferenciais

mantém uma tendência no momento da perfuração e no momento da relaxação da rocha, e em ambos o deslocamento é de encurtamento.

Em geral as curvas mostram uma visível anisotropia da rocha, já que seu comportamento muda com a direção de medição. A idéia da anisotropia é reforçada pela presença de planos de xistosidade bem diferenciados observados no maciço rochoso, o que sugeriria que o comportamento da rocha encaixaria dentro do modelo constitutivo de um material transversalmente isotrópico.

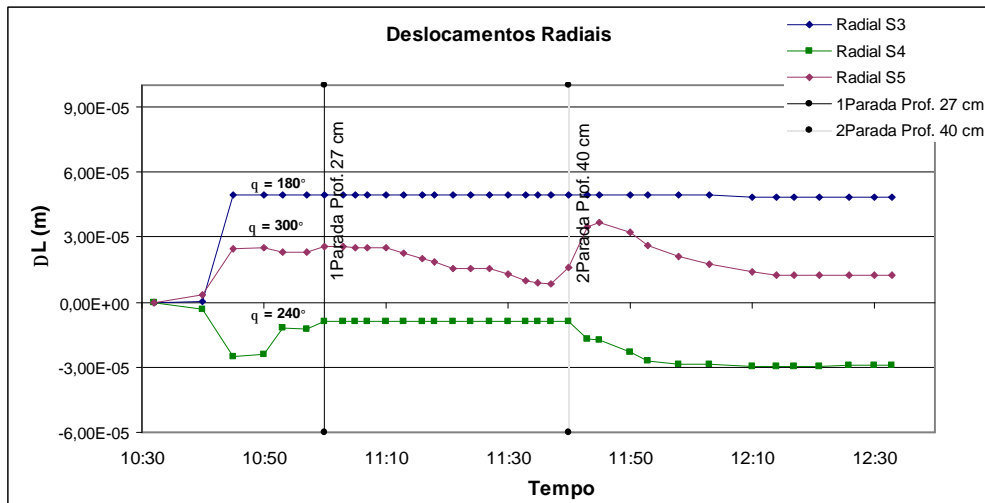


Figura 7.27 – Deslocamentos radiais dos LVDT's com o tempo (ensaio PUC-3).

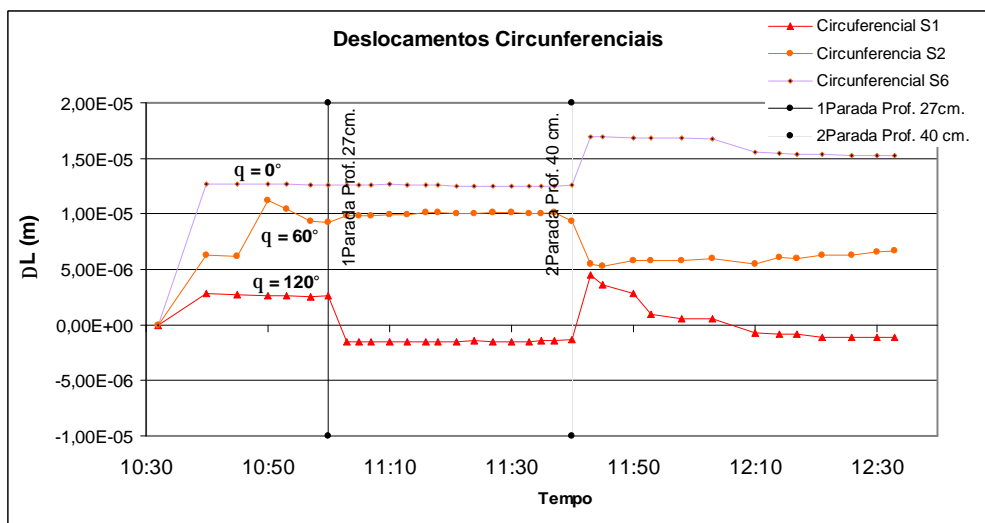


Figura 7.28 – Deslocamentos circunferenciais dos LVDT's com o tempo (ensaio PUC-3).

Apesar da forte anisotropia refletida nos valores de deslocamento, para efeitos de simplificação de cálculos, a rocha foi considerada como isotrópica.

O cálculo das tensões foi feito em três tentativas, a primeira foi considerando os 6 valores de deslocamento obtidos no ensaio, nesta primeira

tentativa os resultados conseguidos não foram consistentes os valores de  $s_1$  e de  $j$  deram negativos, o que significa que as forças atuantes no maciço pelo menos nessa direção são de tração e que a direção dessa força está embaixo da horizontal, aliás o valor de  $s_2$  deu positivo, por tanto seria maior que  $s_1$  o que seria incoerente.

Na segunda tentativa foram eliminados dois LVDT's: o radial S3 que não mostrou mudança de voltagem durante o ensaio, e o circunferencial S1 cujo comportamento foi bastante instável ao longo de todo o ensaio, além de apresentar valores de deslocamento negativos (alongamentos) que diferem do comportamento teórico esperado para os transdutores circunferências. Os resultados obtidos foram os seguintes:  $s_1 = 1.27$  MPa,  $s_3 = 0.31$  MPa e  $j = 26^\circ$  o que significaria que a tensão principal maior estaria formando um ângulo de  $26^\circ$  com relação ao eixo  $x$  sendo.

O ponto mais alto do morro Dois Irmãos é segundo os mapas fornecidos pelo Georio é de 540 metros, levando em conta que os ensaios foram realizados ao pé do Morro, a diferença de alturas seria de 540 metros, aplicando a hipótese das tensões gravitacionais, com uma topografia horizontal, considerando  $g$  da rocha = 0,027 MPa/m o valor das tensões verticais seriam em torno de 14 MPa. Porém na parte onde foram feitos os ensaios o morro alcança uma altura aproximada de 50 metros (ver figura 7.1 para maiores detalhes).

A maneira mais local, como o talude onde foi feito o ensaio apresenta uma altura de 15 metros o valor da tensão vertical localmente deveria ser de 0,41 Mpa, este fato sugere que a tensão  $s_3$  obtida estaria associada à tensão vertical, e o valor de  $s_1$  estaria associado às tensões horizontais (o baixo valor de  $j$  reforça esta afirmação). O maior valor da tensão horizontal poderia ser explicado pelas tensões de compressão que estão atuando no maciço produto da fase de dobramento que afeto à região durante sua história geológica (Nascimento, 1999), outra explicação poderia ser a ocorrência de tensões residuais produto dos processos erosivos que ocasionam descarregamentos na superfície topográfica.

A terceira tentativa feita foi usando somente 3 LVDT's, eliminando-se além do S3 e S1 o S5, que deslocou em sentido contrário ao esperado. Os valores das tensões obtidos nesta análise estão na faixa de 10 Mpa sendo um deles de tração o que discorda do ambiente geológico observado no morro Dois Irmãos.

## 7.2.2.

### Medição da Deformabilidade.

A determinação da deformabilidade é feita com os deslocamentos obtidos na fase de pressurização, estágio que foi feito em quase todos os ensaios realizados, porém em alguns deles, principalmente os realizados em rocha sã (ensaios no IPP) os transdutores não registraram valores de deslocamento aproveitáveis para o cálculo dos módulos pelos problemas já mencionados nas seções anteriores, motivo pelo qual somente serão mostrados os resultados dos ensaios em que se registraram valores de deslocamento estáveis.

#### 7.2.2.1.

### Instituto Pereira Passos - Terceiro Furo (IPP-3)

As curvas obtidas para os deslocamentos circunferenciais são mostradas na figura 7.29, esta curvas correspondem ao terceiro estágio de carregamento, nos primeiros dois os deslocamentos obtidos foram bastante dispersos, problema que também foi observado no primeiro furo executado neste local (IPP-1).

Os LVDT's radiais são os que apresentaram maiores problemas de estabilização de leitura, pois em quase todos os estágios de pressurização não mostraram mudança de voltagem só intermitência, porém alguns deles foram registrados deslocamentos que poderiam ser do material rochoso, mas como são casos isolados e pontuais não foram considerados.

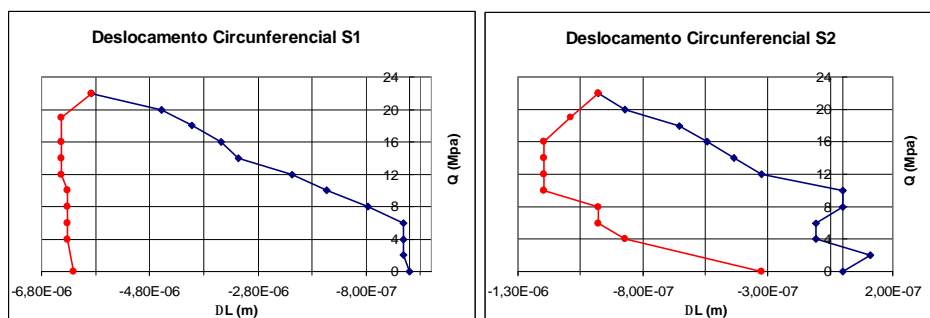


Figura 7.29 – Deslocamentos circunferenciais obtidos no ensaio IPP-3.

#### 7.2.2.2.

### PUC Segundo Furo - (PUC-2) - Local A

Neste ensaio foram realizados três estágios de pressurização, a pressão máxima atingida foi de 6, 25 MPa que ocasionou uma trinca quase paralela à xistosidade da rocha. Os deslocamentos circunferenciais mostrados na figura 7.30 correspondem ao primeiro estágio de pressurização, a pressão máxima atingida foi

de 5 MPa, os maiores deslocamentos foram lidos pelo LVDT S2, sendo precisamente perto deste transdutor que a trinca foi gerada.

Os LVDT's radiais (figura 7.31) apresentam deslocamentos negativos, o que significa que ocorreu alongamento entre pinos, o que discorda com as estimações feitas em base a solução de Kirsch que mostravam que aconteceria encurtamento (deslocamentos positivos). Este fato leva a duvidar da qualidade destes dados e a pressupor que o sistema de monitoramento circunferencial não estava funcionando de uma maneira correta.

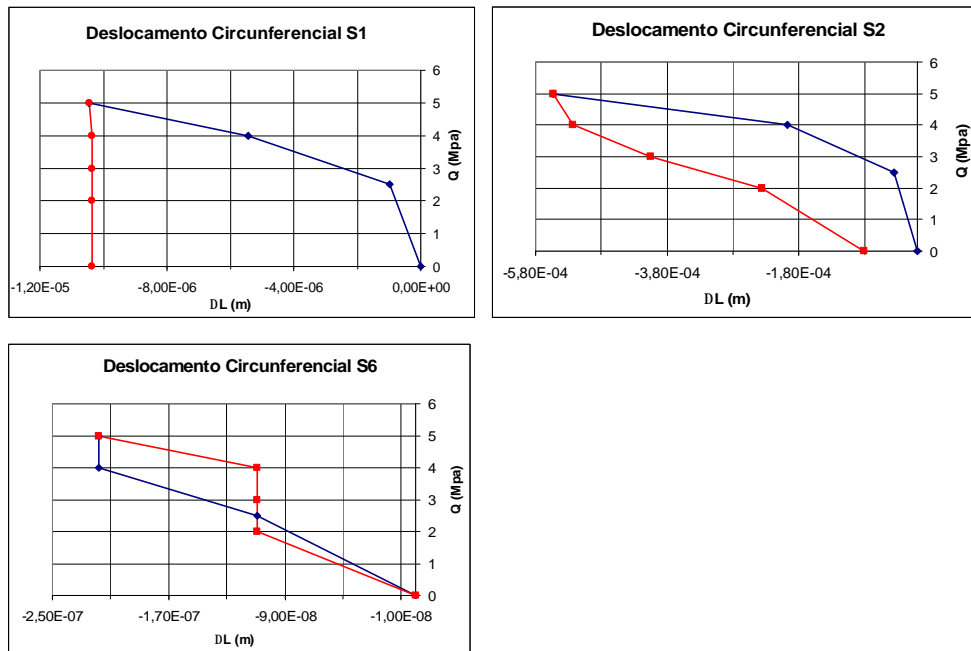
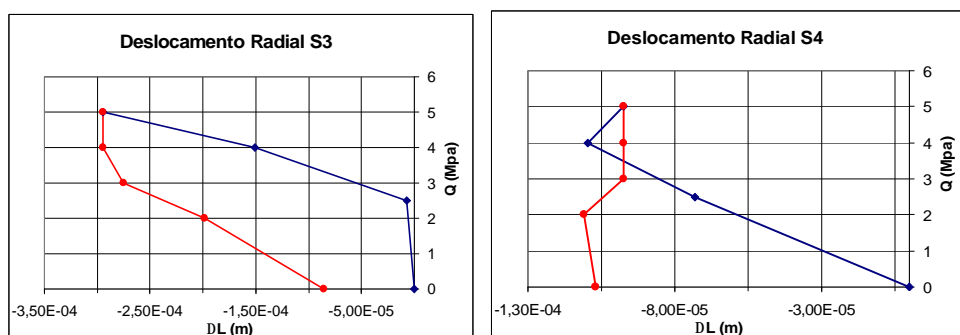


Figura 7.30 – Deslocamentos circunferenciais obtidos no ensaio PUC-2, local A.



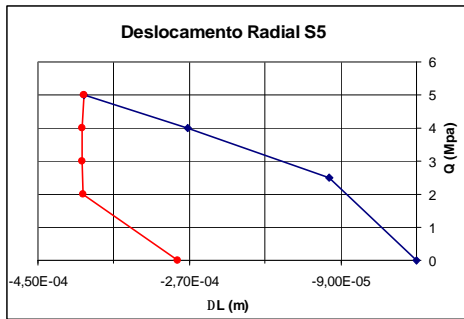
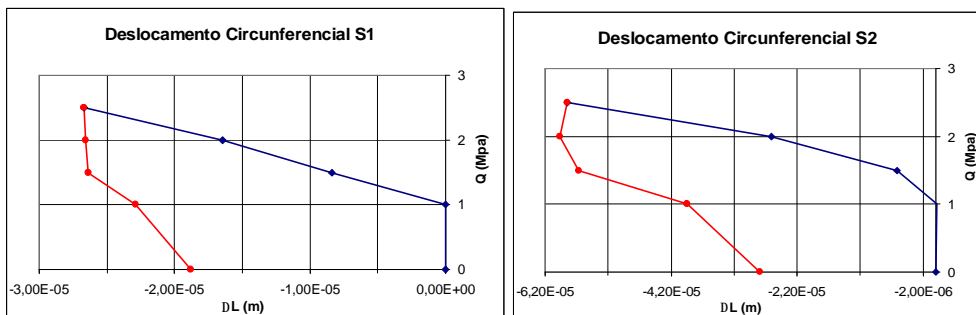


Figura 7.31 – Deslocamentos radiais obtidos no ensaio PUC-2, local A.

### 7.2.2.3.

#### PUC Terceiro furo (PUC-3) Local B

Neste ensaio foram executados dois estágios de pressurização, os deslocamentos mostrados nas figuras 7.32 e 7.33 correspondem a os deslocamentos circunferenciais e radiais respectivamente. Como foi comentado nas seções anteriores o comportamento fora do esperado dos LVDT's radiais que vinham se apresentando ao longo dos ensaios executados, obrigou a fazer uma revisão do sistema de monitoramento da rocha (detalhes destas melhoras já foram tratados na primeira parte do presente capítulo). Aparentemente as medidas adotadas para solucionar deram resultado como consta na figura 7.33 onde os deslocamentos radiais esta vez si foram de encurtamento (deslocamentos positivos).



LVDT S6

Com defeito

Figura 7.32 – Deslocamentos circunferenciais obtidos no ensaio PUC-3, local B.

LVDT S3

Com defeito

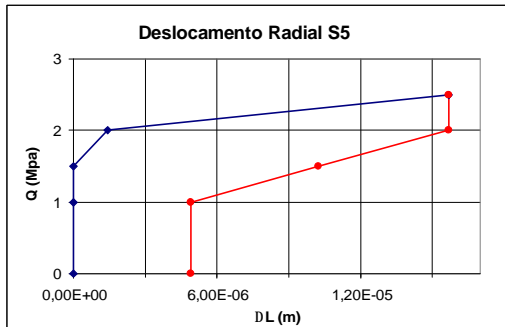
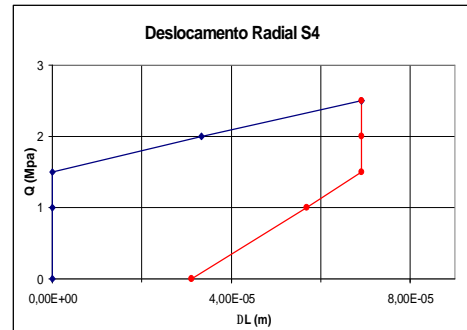


Figura 7.33 – Deslocamentos radiais obtidos no ensaio PUC-3, local B.

### 7.2.3.

#### Determinação do Módulo Cisalhante $G$

##### 7.2.3.1.

##### Metodologia de Análise.

O módulo cisalhante  $G$  foi determinado em base à formulação proposta por Galybin (1997), equações 4.17 e 4.18, usadas para a determinação do módulo de cisalhamento  $G$  a partir das curvas de pressurização. Foram tomados os valores da inclinação de uma reta tangente que passa pela parte inicial da curva (fase mais rígida do material) da fase de carregamento do primeiro estágio de pressurização, determinação feita individualmente para cada transdutor, obtendo-se uma média aritmética dos valores de inclinação da tangente à curva. Na figura 7.34 apresenta-se um exemplo ilustrativo.

O módulo de deformabilidade foi obtido com base à equação 7.1, estimando-se um valor de coeficiente de Poisson de 0,25, considerando que o coeficiente de Poisson,  $u$  em rochas varia de 0,2 a 0,25.

$$G = \frac{E}{2(1+u)} \quad 7.1$$

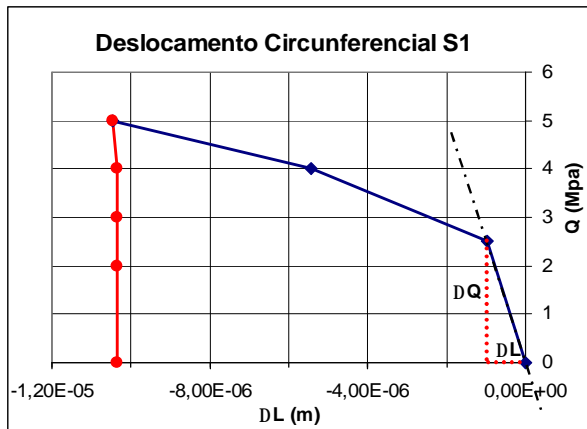


Figura 7.34 – Exemplo de procedimento para a obtenção de G.

Algumas das leituras, nas fases iniciais de carregamento não mostraram mudanças significativas de voltagem, estas medidas para efeito do calculo foram descartadas. Assim mesmo houve problemas nas leituras dos deslocamentos radiais, por conseguinte na análise somente foram considerados os deslocamentos lidos pelos transdutores circunferenciais.

Outro parâmetro que pode-se obter da análise das curvas é o módulo cisalhante  $G$  na fase de descarregamento da curva pressão interna – deslocamento e a partir deste parâmetro obter o módulo de elasticidade da rocha.

O procedimento de cálculo é o mesmo que o usado na fase de carregamento foram tomados os valores da inclinação de uma reta tangente que passa pela parte final da curva de descarregamento. Na figura 7.35 apresenta-se um exemplo ilustrativo.

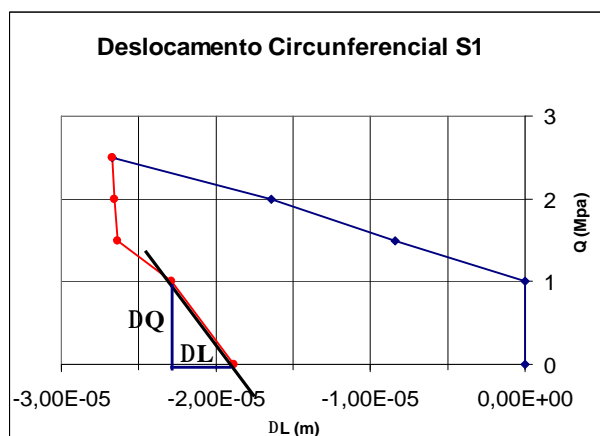


Figura 7.35 – Exemplo de procedimento para a obtenção de G na fase de descarregamento



### 7.2.3.2.

#### Valores do Módulo Cisalhante $G$ obtidos na fase de Carregamento

Como exemplo do procedimento utilizado para o cálculo do módulo cisalhante  $G$ , vão ser calculados os valores de  $G$  e do módulo de deformabilidade  $E$  para o ensaio PUC-2 local A na PUC. Os valores de deslocamento  $DL$  e de pressão interna  $Q$  é mostrada na tabela 7.2.

Tabela 7.2 – Valores de deslocamento obtidos na fase de pressurização do ensaio PUC-2 local A-PUC.

LVDT	Pressão $Q$ (MPa)	$DL$ (m)
S1	0	0
	2,5	$-9,80 \times 10^{-07}$
S2	0	0
	2,5	$-3,57 \times 10^{-05}$
S6	0	0
	2,5	$-1,09 \times 10^{-07}$

Usando-se a equação 4.18 para deslocamentos circunferenciais:

$$M_c = -\frac{\Delta Q}{\langle \Lambda_c \rangle} = -\frac{-2,5}{1,23 \times 10^{-5}} = 203759 \quad 7.2$$

Onde:

$M_c$  é o módulo de rigidez do material

$DQ$  é a diferença entre dois valores de pressão

$\langle \Lambda_c \rangle$  é a média aritmética dos valores de deslocamento circunferencial.

A equação 7.1 deve ser multiplicada pelo fator de forma  $f$  (equação 7.3) que é um valor que depende da geometria dos transdutores e das dimensões do furo.

$$f = \frac{R^2 d}{2r_2^2} = 0.003 \quad 7.3$$

Em que:

$R$  é o raio do furo central

$d$  é o comprimento do transdutor circunferencial

$r_2$  é a distancia entre o centro do furo central e os pinos

Finalmente o módulo cisalhante  $G$  é encontrado pela equação 7.4.

$$G = M_c \cdot f = 611 \text{ MPa} \quad 7.4$$

Aplicando a equação 7.1, o valor do módulo de deformabilidade seria:

$$E = 2,5G = 1528 \text{ MPa} \quad 7.5$$

Na tabela 7.3 se apresentam os valores dos módulos de deformabilidade encontrados para os maciços rochosos ensaiados.

Tabela 7.3 – Valores dos módulos de deformabilidade obtidos para os maciços rochosos ensaiados.

Local	Tipo de Rocha	Módulo E de deformabilidade (MPa)
Local A – PUC	Gnaisse augen facoidal	1528
Local B – PUC	Gnaisse augen facoidal	518
IPP	Leptinito	30466

### 7.2.3.3.

#### Valores do Módulo Cisalhante $G$ obtidos na fase de Descarregamento

A determinação do módulo cisalhante  $G$  no descarregamento e do módulo de elasticidade foi feita com base às equações usadas no módulo de deformabilidade na fase de carregamento, sendo que nos cálculos foram utilizadas as mesmas curvas usadas para a determinação do módulo cisalhante na fase de carregamento. Os resultados obtidos são mostrados na tabela 7.4.

Tabela 7.4 – Valores dos módulos de deformabilidade e de elasticidade obtidos para os maciços rochosos ensaiados.

Local	Tipo de Rocha	Módulo E de deformabilidade (MPa)	Módulo E de elasticidade (MPa)
Local A – PUC	Gnaisse augen facoidal	1528	-
Local B – PUC	Gnaisse augen facoidal	518	963
IPP	Leptinito	30466	91828

Os valores de módulo de elasticidade, obtidos na fase de descarregamento, são maiores que os módulos de deformabilidade obtidos na fase de carregamento, no caso do gnaisse facoidal foram de aproximadamente duas vezes mais, no caso do leptinito foi três vezes mais. O maior valor do módulo pode ser explicado pela

faixa de deslocamentos produzidos na fase de descarregamento, aparentemente o material não recupera com a mesma velocidade as deformações como quando é carregada, por isso a ordem de grandeza das deformações no descarregamento é menor, produzindo uma maior inclinação da curva tensão-deformação, porém esta inclinação também depende da máxima pressão aplicada na fase de carregamento.

No caso do módulo de deformabilidade correspondente ao local A, não se conseguiu determinar o módulo de descarregamento devido à dispersão dos dados obtidos nesta fase do ensaio, como pode ser visto na figura 7.31 uma das curvas (circunferencial S1) quase não mostrou mudanças de deslocamento, o que evidencia que a rocha acumulou uma grande magnitude de deformação permanente, no outro LVDT (circunferencial S2), a inclinação da curva na fase de descarregamento é menor que na fase de carregamento, gerando valores de módulo cisalhante menores que na fase de carregamento, já na última curva os valores são muito dispersos.

#### 7.2.3.4.

#### **Variação do módulo $E$ com o grau de Intemperismo**

A influência do grau de intemperismo nas propriedades mecânicas da rocha foi comentada no capítulo 3. Para avaliar o grau de intemperismo dos maciços rochosos foi utilizada a classificação proposta por Barroso (1994), empregando-se a tabela 2.5, a avaliação e classificação do grau de intemperismo dos maciços rochosos estudados foi feita diretamente em campo, nos taludes ensaiados, depois esta classificação foi corroborada com a análise mais detalhada dos testemunhos obtidos como produto da perfuração do furo central. Os resultados desta classificação e a relação com o módulo de deformabilidade obtidos são mostrados na tabela 7.5.

Tabela 7.5 – Classificação do grau de intemperismo dos maciços rochosos ensaiados.

<b>Local</b>	<b>Tipo de Rocha</b>	<b>Módulo E (MPa)</b>	<b>Grau de Intemperismo</b>
Local A – PUC	Gnaisse augen facoidal	1528	III
Local B – PUC	Gnaisse augen facoidal	518	IV
IPP	Leptinito	30466	I

Analisando os resultados mostrados na tabela 7.5 é visível a variação do módulo de deformabilidade com o grau de intemperismo, no leptinito rocha são sem ou pouco grau de intemperismo, o valor de  $E$  encontrado esta dentro da faixa de valores encontrados por diferentes autores (Vallejo 2002, Jumikis 1983, *et al.*) usando outros métodos de calculo. Já em rochas um pouco mais intemperizadas como é o caso dos maciços rochosos localizados na PUC os valores de  $E$  são valores bastante baixos em comparação com os de rocha são, decrescendo em valores conforme aumenta o grau de intemperismo.

No trabalho apresentado por Barroso (1994), mostra uma série de valores de módulos de deformabilidade das variedades de gnaiss do Rio de Janeiro, obtidos a partir de ensaios de compressão uniaxial (conforme tabela 7.6).

Comparando os valores da tabela 7.5 com os valores da tabela 7.6, pode se concluir que os valores obtidos *in situ* pelo método desenvolvido, são de aproximadamente 10% dos valores obtidos nos ensaios feitos em laboratório. Conclui-se também que conforme maior o grau de intemperismo menores os valores dos módulos, sendo fato comum em ambos resultados.

Esta evidente diferença de faixa de valores entre um método e outro pode ser explicado pelas condições do ensaio; os ensaios em campo são influenciados pelo clima, a temperatura, grau de fraturamento, erros de leitura, efeitos particulares do terreno/ambiente. Em laboratório apesar de ter outro tipo de fontes de erro, têm se uma melhor capacidade de controle do ensaio.

Um outro fato a ser considerado é anisotropia do material, para facilidade de calculo e de redução de variáveis a rocha foi considerada como isotrópica, mas como pode ser confirmada nas curvas de pressão-deslocamento, a diferença nas grandezas de deslocamentos de uma mesma rocha medidas em diferentes direções é bastante alta, o que é um indicativo de anisotropia. Nos dados da tabela 7.6 Barroso (1994) dá evidencias claras do papel importante de anisotropia na deformabilidade da rocha, pois conforme vai variando o ângulo  $b$  (ângulo entre a foliação da rocha e a direção de carregamento) vai variando também o valor de  $E$ , este mesmo autor comenta também que para os dados específicos do Leptinito, os ângulos  $b$  entre  $30^\circ$  e  $45^\circ$  produzem menores valores de deformabilidade. Hees (1996), também fez ensaios de laboratório em leptinito considerando a anisotropia do material, ele considerou o maciço como transversalmente isotrópico, obtendo

uma media de valores de  $E_1 = 15,2$  GPa (paralelo à xistosidade),  $E_2 = 10,4$  GPa (transversal à xistosidade), e  $\nu = 0,21$ .

Tabela 7.6 – Valores de deformabilidade para diferentes graus de intemperismo das principais rochas metamórficas do Rio de Janeiro, extraído de Barroso (1994).

	Ângulo b	Gnaiss Augen		Kinzigito		Leptinito	
		$E_{dil}$ (GPa)	$\nu_{dil}$	$E_e$ (GPa)	$\nu_e$	$E_e$ (GPa)	$\nu_e$
Classe I	00°	33.0	0.10	65.7	0.26	22.7	0.10
	45°	23.1	0.12	58.0	0.24	9.6	0.14
	90°	23.7	0.10	52.2	0.23	11.4	0.08
Classe II	00°	12.4	0.13	37.6	0.35	15.7	0.10
	45°	14.0	0.14	16.2	0.24	9.1	0.07
	90°	6.7	0.14	24.6	0.24	11.6	0.08
Classe III	00°	9.9	0.16	7.8	0.35	4.2	0.12
	45°	10.1	0.08	8.6	0.42	4.5	0.12
	90°	5.0	0.14	5.6	0.09	3.0	0.13
Classe IV	00°	1.3	0.24	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
	45°	1.4	0.19	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
	90°	1.2	0.14	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.