



Jhoan Sadith Paredes Panitz

**Desenvolvimento e Implementação de Metodologias para a
Determinação da Deformabilidade e Tensões em
Maciços Gnáissicos**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil

Orientador: Eurípedes Vargas Jr.
Co – orientador: Rodrigo Figueiredo

Rio de Janeiro
Setembro de 2007

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.



Jhoan Sadith Paredes Panitz

**Desenvolvimento e Implementação de Metodologias para a
Determinação da Deformabilidade e Tensões em
Maciços Gnáissicos**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial
para obtenção do grau de Mestre pelo
Programa de Pós-graduação em Engenharia
Civil da Puc-Rio. Aprovada pela Comissão
Examinadora abaixo assinada:

Prof. Eurípedes do Amaral Vargas Jr.

Orientador e Presidente
Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

Prof. Rodrigo Peluci de Figueiredo

Co - orientador
Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP

Prof. Tácio Mauro P. de Campos

Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

Prof. Aldo Durand Farfán

Universidade Estadual do Norte Fluminense – UENF

José Eugênio Leal

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 13 de setembro de 2007.

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

Jhoan Sadith Paredes Panitz

Graduou-se em Geologia de Engenharia em 2000 pela Universidad Nacional de San Agustín (UNSA-Peru). Trabalhou na área de Mineração e Geotecnia tais como: Volcan Cia minera SAA, Doe Run Peru Cobrisa Division Mauricio Holschild S.A.C., Ingressou em 2005 no curso de mestrado em Engenharia Civil da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, na área de Geotecnia, desenvolvendo dissertação de mestrado na linha de pesquisa de Mecânica das Rochas.

Ficha Catalográfica

Panitz, Jhoan Sadith Paredes

Desenvolvimento e implementação de metodologias para a determinação da deformabilidade e tensões em maciços gnáissicos / Jhoan Sadith Paredes Panitz ; orientador: Eurípedes Vargas Jr. ; co-orientador: Rodrigo Figueiredo. – 2007.

150 f. : il.(col.) ; 30 cm

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

Inclui bibliografia

1. Engenharia civil – Teses. 2. Maciço rochoso. 3. Deformabilidade. 4. Pressiômetro. 5. Tensões. 6. Intemperismo. I. Vargas Júnior, Eurípedes. II. Figueiredo, Rodrigo. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. III. Título.

A Deus, por ter me dado saúde.

Aos meus queridos pais: Margarita e Raúl, por terem me dado educação.
Às mias tias Rosa Francisca e Maria Josefa pelo seu apoio durante
minha carreira universitária.

Agradecimentos

A Deus e a Nossa Senhora pelo dom da vida e cuja fé neles, me deu a força necessária para vencer com lucidez todos os obstáculos que tive.

Aos Professores Eurípides Vargas Jr., Rodrigo Figueiredo, Luiz A. Gusmão e Cláudio P. de Amaral pela orientação e guia durante esta pesquisa.

Aos meus queridos pais, Raúl e Margarita, pelo grande incentivo, mas torcendo muito pelo meu sucesso na minha Universidade.

A CAPES pelo apoio Financeiro.

Aos meus Irmãos: Daniel, Eliana, e Geraldine pelo apoio durante meus estudos do mestrado.

Aos meus professores, Eurípides Vargas Jr, Celso Romanel, Alberto Sayão, Sergio Fontoura, Franklin Antunes, Tácio M. P. de Campos pelos conhecimentos transmitidos, pela paciência que tiveram comigo e principalmente pelos inúmeros conselhos que me serão úteis por toda a vida.

Agradecer aos amigos que participaram na revisão da presente tese: Arthur, Marianna, Priscila, Felipe, João, e especialmente ao meu amigo Wagner Nahas pelo apoio no desenvolvimento desta pesquisa.

Ao João, Pedro e Marcelo, galera curitibana que me ajudaram com as matérias no primeiro ano de mestrado.

Aos técnicos do laboratório seu Zé, Amauri, William e Josué.

A secretária de pós-graduação Ana Roxo e Rita de Cássia pela grande ajuda e amizade nestes anos de mestrado;

Ao professor Pablo Meza da Universidad Nacional de San Agustín (UNSA – Perú) pelo apoio e incentivo em estudar Geotecnia.

Meus sinceros agradecimentos a todas aquelas pessoas não citadas, mas que de alguma forma contribuíram para o sucesso deste trabalho.

Resumo

Panitz, Jhoan Sadith Paredes; Vargas Jr., Eurípedes do Amaral; Figueiredo, Rodrigo Peluci de. **Desenvolvimento e Implementação de Metodologias para a Determinação da Deformabilidade e Tensões em Maciços Gnáissicos**. Rio de Janeiro, 2007. 150 p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O presente trabalho apresenta os resultados de um programa experimental com o intuito de determinar propriedades de deformabilidade e tensões *in-situ* em rochas gnáissicas. A determinação das tensões *in situ* é fundamental para qualquer trabalho em mecânica de rochas, serve como condições de campo em problemas de engenharia e em escalas maiores dá alguns indícios do mecanismo que ocasiona a movimentação de placas tectônicas. O módulo de deformabilidade é um dos principais parâmetros de entrada na análise do comportamento de maciços rochosos que incluem deformações. Este parâmetro geralmente é obtido a partir de ensaios de laboratório em amostras de rochas. Em geral os resultados destes ensaios não representam as propriedades *in situ* de todo o maciço rochoso, pois uma amostra intacta em laboratório pode ser muito menor que o maciço rochoso que contém um grande número de planos de fraqueza. A presente pesquisa compreende as etapas de projeto, montagem e aplicação de um pressiômetro como um instrumento para a determinação dos parâmetros de deformabilidade e estado de tensões nos maciços rochosos. Os dados obtidos foram usados para investigar a variação destes parâmetros com o grau de intemperismo. Um sistema de instrumentação foi projetado para tentar monitorar a resposta da rocha às solicitações de carregamento (no caso da determinação do módulo de deformabilidade) e descarregamento (no caso de medição das tensões *in situ*). A aplicação do pressiômetro foi realizada em maciços rochosos localizados no cidade do Rio de Janeiro afetados por diferentes níveis de intemperismo. Realizaram-se ensaios de pressurização e medição de deslocamentos no momento da escavação dos furos para determinar o estado de tensões da rocha. Os resultados foram processados, interpretados e comparados com ensaios de laboratório anteriormente realizados por outros autores.

Palavras-chave

Maciço rochoso, deformabilidade, pressiômetro, tensões, intemperismo.

Abstract

Panitz, Jhoan Sadith Paredes; Vargas Jr., Eurípedes do Amaral; Figueiredo, Rodrigo Peluci de (Advisors). **Development and Implementation of Methodologies for the determination of the deformability and Stress in Gnaissic Rock Masses.** Rio de Janeiro, 2007. 150 p. MSc. Dissertation – Department of Civil Engineering, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

This thesis presents the results from an experimental program with intention to determine the properties of deformability and in situ stress in gnaissic rocks. The determination of in situ stress is fundamental for any work in rock mechanics, it is use like field conditions at the in engineering problems, and in bigger scales it gives some indications of the mechanics that produce the tectonics plate's movements. The deformation's modulus is one of the main parameters in the analysis of the behavior of rocks mass that include deformations. This parameter usually is gotten from laboratory assays in rocks samples. In general the results of these assays do not represent the in situ properties of all the rock mass, therefore an intact rock sample in laboratory could be smaller that the rock mass that contains a great number of weakness planes. This research understands the stages of project, assembly and application of the pressuremeter as an instrument for the determination of the deformability and in situ stress parameters in rock mass. The gotten data had been used to investigate the variation of these parameters with the weathering degree. An instrumentation system was projected to try to monitor the answer of the rock to load (in the case of deformability's modulus) and unload (in the case of in situ stress measurement). The application of the pressuremeter was carried trough in rock masses located in the Rio de Janeiro city whose were affected by different levels of weathering. Assays of pressurization and measurements of displacements at the moment of the hole drilling in order to determine the in situ stress. The results had been processing, interpreted and compared with laboratory assays previously carried trough by another authors

Keywords

Rock mass, deformability, pressuremeter, stress, weathering

Sumário

1 Introdução	24
1.1. Generalidades.	24
1.2. Objetivos da Pesquisa	24
1.3. Organização do Trabalho	25
2 Perfis de Intemperismo	27
2.1. Introdução	27
2.2. Conceito de Intemperismo	27
2.3. Tipos de Intemperismo	27
2.3.1. Intemperismo Mecânico	27
2.3.2. Intemperismo Químico	28
2.4. Fatores de Formação.	28
2.5. Intemperismo nas Rochas Brasileiras.	30
2.6. Variação das Propriedades Geotécnicas com o Intemperismo	33
2.6.1. Índices Físicos	33
2.6.2. Índices Químicos	33
2.6.3. Índices Geomecânicos	37
2.7. Aspectos Geológicos do Município de Rio de Janeiro	39
2.7.1. Geologia Regional	39
2.7.2. Morfologia típica de perfis de intemperismo em Gnaisses do Rio de Janeiro	42
2.7.2.1. Perfil de intemperismo do Kinzigito	42
2.7.2.2. Perfil de intemperismo do Gnaiss Augen	42
2.7.2.3. Perfil de intemperismo do Leptinito	43
2.7.3. Classificação dos Maciços Rochosos Intemperizados	43
3 Elasticidade, Deformabilidade e Tensões nos Maciços Rochosos.	46
3.1. Introdução.	46
3.2. Constantes Elásticas nas Rochas	46
3.2.1. Elasticidade nas Rochas	47

3.2.2. Constantes Elásticas	51
3.3. Fatores que Influenciam o Módulo de Deformabilidade das Rochas	53
3.4. Determinação dos Parâmetros de Deformabilidade	55
3.4.1. Determinação Direta - Ensaios <i>In Situ</i>	58
3.4.2. Determinação Indireta	60
3.4.2.1. Métodos Geofísicos.	60
3.4.2.2. Correlações Empíricas	61
3.5. Tensões em Maciços Rochosos	63
4 A técnica do Pressiômetro e sua Aplicação na Determinação de Propriedades Mecânicas das Rochas	68
4.1. Introdução	68
4.2. Hipótese e Fundamentos da Técnica	70
4.2.1. Descrição Geral do Método	70
4.2.2. Hipótese Adotada	72
4.2.3. Modelos Matemáticos Empregados	73
4.3. Esquema de Medidas Adotado	74
4.3.1. Método Proposto por Dean & Beatty (1968)	74
4.3.2. Esquema de Medidas Proposto por Galybin & Dyskin (1999)	76
4.3.3. Procedimento para a Reconstrução das tensões e o Módulo	77
4.3.3.1. Variação da distância entre Pinos	77
4.3.3.2. Reconstrução do Módulo Cisalhante	78
4.3.3.3. Reconstrução das Tensões <i>in situ</i> e da Constante de Poisson	79
4.3.4. Análise de Sensibilidade	79
4.3.5. Distribuição Final dos Pinos	81
5 Desenvolvimento do Pressiômetro	83
5.1. Introdução	83
5.2. Estudo do Projeto	83
5.2.1. Fundamentos de Instrumentação	83
5.2.2. Avaliação de Protótipos para o Projeto	84
5.3. Características das Partes Constituintes	86
5.3.1. Membrana Semiflexível	86
5.3.2. Anel e Rosca de Fixação da Membrana	87

5.3.3. Anéis de Fixação do Equipamento Dentro do Furo	88
5.3.4. Eixo Central	89
5.3.5. Conectores	89
5.3.6. Camisa de Apoio	90
5.3.7. Características das Demais Partes Constituintes	90
5.4. Montagem do Pressiômetro	91
5.5. Fonte de Pressão	93
5.6. Sensor de Deslocamentos	94
5.7. Sistema de Aquisição de Dados	95
5.7.1. Fonte de Alimentação e Regulador de Voltagem.	95
5.7.2. Voltímetro	95
5.7.3. Caixa Seletora	96
5.8. Calibração do Equipamento	96
5.8.1. Cálculo de Perda de Pressões por Efeito da Rigidez da Membrana	96
5.8.1.1. Pressão Transmitida ao Cilindro de Aço	96
5.8.1.2. Pressão Transmitida à Rocha	99
5.8.2. Calibração dos Transdutores	101
5.8.2.1. Metodologia Empregada	101
5.8.2.2. Resultado das Calibrações	101
6 Metodologia de Instalação, Montagem e execução do Ensaio	103
6.1. Equipamentos e Instrumentação para a Instalação dos Sensores de Deslocamento	103
6.1.1. Equipamentos de Perfuração e Brocas	103
6.1.2. Marteleto e Brocas de Encaixe	104
6.1.3. Fixador Químico dos Pinos	104
6.1.4. Pinos de Aço e Chapas de Suporte	105
6.1.5. Gabaritos.	105
6.2. Procedimentos para a Instalação dos Equipamentos e Execução do Ensaio	106
7 Resultados e Discussões	109
7.1. Ensaio executados	109
7.1.1. Primeiro Teste: Campus da P.U.C	109

7.1.1.1. Primeiro Furo PUC (PUC-1)	111
7.1.2. Segundo ensaio: Instituto Pereira Passos (IPP)	113
7.1.2.1. Primeiro Furo IPP (IPP-1)	114
7.1.2.2. Segundo Furo IPP (IPP-2)	117
7.1.2.3. Terceiro Furo IPP (IPP- 3)	120
7.1.3. Terceiro ensaio: Campus da PUC	123
7.1.3.1. Segundo Furo PUC (PUC-2) - Local A	123
7.1.3.2. Terceiro Furo PUC (PUC – 3) - Local B	126
7.2. Resultados	127
7.2.1. Medição das Tensões “in situ”	127
7.2.1.1. Instituto Pereira Passos - Segundo Furo (IPP-2)	128
7.2.1.2. Instituto Pereira Passos - Terceiro Furo (IPP-3)	130
7.2.1.3. PUC - Terceiro furo (PUC-3) Local B	133
7.2.2. Medição da Deformabilidade.	136
7.2.2.1. Instituto Pereira Passos - Terceiro Furo (IPP-3)	136
7.2.2.2. PUC Segundo Furo - (PUC-2) - Local A	136
7.2.2.3. PUC Terceiro furo (PUC-3) Local B	138
7.2.3. Determinação do Módulo Cisalhante G	139
7.2.3.1. Metodologia de Análise.	139
7.2.3.2. Valores do Módulo Cisalhante G obtidos na fase de Carregamento	141
7.2.3.3. Valores do Módulo Cisalhante G obtidos na fase de Descarregamento	142
7.2.3.4. Variação do módulo E com o grau de Intemperismo	143
8 Conclusões e Sugestões	146
8.1. Conclusões	146
8.2. Recomendações	147
Bibliografia	148

Lista de figuras

- Figura 2.1 – Curvas de alterabilidade de rochas ácidas, neutras e ultrabásicas; Sertã (1984). 23
- Figura 2.2 – Perfil de Alteração Típico de Rochas Metamórficas e Graníticas em Regiões de Relevo Suave; Pastore apud Oliveira (1995). 26
- Figura 2.3 – Perfil de Alteração Típico de Rochas Metamórficas e Graníticas em Regiões de Serra; Pastore apud Oliveira (1995). 26
- Figura 2.4 – Diagrama de relação do intemperismo químico com respeito à presença de minerais (Kronberg&Nesbitt, 1981); extraído de Almeida,1987). 30
- Figura 2.5 – Mapa Geológico do SE do Rio de Janeiro. Pode-se verificar a ocorrência de todos os Gnaisses da Série Superior; Pastore (1995), extraído de Barroso 1994. 35
- Figura 2.6 – Seção transversal nos materiais da Vista Chinesa; Barroso (1993). 36
- Figura 2.7 – Influência do controle estrutural em um perfil de intemperismo de um Gnaiss Augen; Barroso (1994). 37
- Figura 3.1 – Relações tensão-Deformação das rochas; Farmer (1968). 42
- Figura 3.2 – Modelos de comportamento tensão-deformação; Vallejo (2002). 43
- Figura 3.3 – Curva generalizada tensão – deformação para rochas; Farmer (1968). 44
- Figura 3.4 – Relação entre o módulo de elasticidade e a constante de Poisson, módulo cisalhante e resistência à compressão uniaxial; extraído de Farmer (1968). 47
- Figura 3.5 – Relação entre o módulo de elasticidade e a densidade (Judd and Huber); Farmer (1968). 48
- Figura 3.6 – Representação do efeito escala Cunha (1990); extraído de Galera (2005). 51
- Figura 3.7 - Variação das propriedades das rochas segundo o volume considerado. Geralmente, a dispersão dos valores medidos diminui ao aumentar o tamanho; Vallejo (2005). 52
- Figura 3.8 – Variação de deformabilidade do maciço rochoso em função da escala considerada; a curva tende estabilizar-se para volumes cerca ao V.E.R (Cunha

,1990);Vallejo (2002).	54
Figura 3.9 – Correlação entre o módulo cisalhante estático e dinâmico; Galera et al. 2005.	55
Figura 3.10 – Influência da escavação na distribuição das tensões in situ.	57
Figura 3.11 – Origem e orientação das tensões tectônicas segundo Zoback et al. (1989), extraído de Amadei (1997).	59
Figura 4.1 – Esquema do ensaio do pressiómetro	66
Figura 4.2 – Sistema de coordenadas relacionadas com o problema: (x,y) é o sistema de coordenadas relacionadas ao furo central; 1 e 2 são as direções das tensões principais (u_r, u_θ) são as componentes dos deslocamentos em coordenadas polares.	68
Figura 4.3 – Esquema de medidas proposto por Dean & Beatty para o método do macaco cilíndrico.	69
Figura 4.4 – Esquema de medidas proposto por Galybin et al	71
Figura 4.5 – Sensibilidade dos deslocamentos radiais com relação à variação da localização do ponto A.	74
Figura 4.6 – Sensibilidade dos deslocamentos radiais com relação à variação da longitude A - B.	75
Figura 4.7 – Distâncias entre pinos e distribuição final dos LVDT's ao redor do furo.	76
Figura 5.1 – (a)membrana original do equipamento, (b) Protótipos de membrana; (c) protótipo final.	79
Figura 5.2 – (a), (b) Ruptura dos anéis; (c) segundo protótipo; (d) modelo final.	80
Figura 5.3 – Camisa protetora do pressiómetro.	80
Figura 5.4 – Membrana expansível.	81
Figura 5.5 – Anel de fixação da membrana expansível.	82
Figura 5.6 – Rosca de fixação da membrana expansível.	82
Figura 5.7 – Anel de fixação do equipamento dentro do furo.	83
Figura 5.8 – Eixo central do pressiómetro.	83
Figura 5.9 – Conector inferior (a) e superior (b).	84
Figura 5.10 – Camisa de apoio do eixo.	84
Figura 5.11 – (a) Conexão tipo engate rápido, (b) e (c) anéis de vedação, (d) rosca de fixação do eixo central, (d) rosca de vedação.	85

Figura 5.12 – Detalhe do sistema de fixação da membrana expansível.	86
Figura 5.13 – Seção longitudinal do pressiômetro	87
Figura 5.14 – (a) Maçado hidráulico de braço, (b) Detalhe da conexão macaco – pressiômetro.	88
Figura 5.15 – Sensores de deslocamento (LVDT) modelo PY2.	89
Figura 5.16 –(a) Fonte de alimentação primária, (b) regulador de voltagem.	89
Figura 5.17 – Multímetro digital para registro das variações de voltagem.	90
Figura 5.18 – Caixa seletora de 6 canais.	90
Figura 5.19 – Interação borracha-aço.	91
Figura 5.20 – Interação borracha- rocha.	94
Figura 5.21 – Curva de calibração do LVDT PY2.	95
Figura 5.22 – Variação da voltagem em função da longitude para o LVDT PY2.	96
Figura 6.1 – (a) Esmerilhadeira modelo GA9020, (b) válvula para o controle da água do sistema de perfuração, (c) brocas diamantadas de 50 e 450 mm. De comprimento, (d) detalhe dos diamantes na coroa da broca.	97
Figura 6.2 – Marteleto e broca de encaixe.	98
Figura 6.3 – Cimentante químico e pistola de injeção.	98
Figura 6.4 – Sistema de suporte para os sensores de deslocamento (LVDTs).	99
Figura 6.5 – Gabarito de madeira usado para a localização dos pinos e direção dos furos.	100
Figura 6.6 – Sistema de suporte para os sensores de deslocamento (LVDT's).	100
Figura 6.7 – Esquema mostrando o sistema de fixação dos sensores.	101
Figura 7.1 – Mapa geológico – geotécnica do local do ensaio na PUC, extraído de Georio, 2007.	104
Figura 7.3 – (a) Momento de secagem do cimentante com os gabaritos de aço, (b) amostra obtida como produto da perfuração.	105
Figura 7.4 – Trinca gerada na rocha como produto da pressurização do furo.	106
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.	106
Figura 7.6 – Mapa geológico - geotécnica do local onde foram feitos os ensaios no IPP, extraído do Georio, 2007.	108
Figura 7.7 – (a) Fundos do pátio do estacionamento do IPP, (b) Vista mais de perto	

do maciço rochoso.	108
Figura 7.8 – Testemunho retirado do furo IPP-1.	109
Figura 7.9 – (a)Direcionando o furo central, (b) momento da perfuração dos pinos com o marteleto, (c) LVDT's montados para o início da pressurização, (d) macaco hidráulico (detalhe da válvula instalada para controlar o fluxo de óleo).	109
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.	110
Figura 7.11 – (a), (b) expansão pouco uniforme da membrana ao ar, (c) modelo da nova membrana.	111
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.	113
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	113
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.	115
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.	116
Figura 7.16 – Detalhe da fissura, bordos e degraus da membrana.	116
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.	117
Figura 7.18 – Trinca gerada no momento da pressurização do furo PUC-2.	118
Figura 7.19 – Esquema que mostra o possível comportamento dos pinos por efeito da deformação da membrana.	119
Figura 7.20 – Projeto do novo esquema adotado e o comportamento esperado dos pinos dentro do furo.	120
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.	121

Figura 7.22 – Disposição dos LVDTs no furo IPP-2.	123
Figura 7.23 – Deslocamentos obtidos durante e após a perfuração (ensaio IPP-2).	123
Figura 7.24 – Disposição dos LVDT's no furo IPP-3.	125
Figura 7.25 – Deslocamentos obtidos durante e após a perfuração (ensaio IPP-2).	125
Figura 7.26 – Disposição dos LVDT's no furo PUC-3.	127
Figura 7.27 – Deslocamentos radiais dos LVDT's com o tempo (ensaio PUC-3).	128
Figura 7.28 – Deslocamentos circunferenciais dos LVDT's com o tempo (ensaio PUC-3).	128
Figura 7.29 – Deslocamentos circunferenciais obtidos no ensaio IPP-3.	130
Figura 7.30 – Deslocamentos circunferenciais obtidos no ensaio PUC-2, local A.	131
Figura 7.31 – Deslocamentos radiais obtidos no ensaio PUC-2, local A.	132
Figura 7.32 – Deslocamentos circunferenciais obtidos no ensaio PUC-3, local B.	132
Figura 7.33 – Deslocamentos radiais obtidos no ensaio PUC-3, local B.	133
Figura 7.34 – Exemplo de procedimento para a obtenção de G.	134
Figura 7.35 – Exemplo de procedimento para a obtenção de G na fase de descarregamento	134

Lista de tabelas

Tabela 2.1 – Esquema para classificação e descrição de maciços rochosos intemperizados (ISRM, 1981).	25
Tabela 2.2 – Variação dos índices físicos de um granito com o grau de intemperismo (Irfam & Dearman, 1978), extraído de Almeida (1987).	29
Tabela 2.3 – Variação dos parâmetros de deformabilidade de um granito com o grau de intemperismo (Irfam & Dearman, 1978), extraído de Almeida (1987).	32
Tabela 2.4 – Estratigráfica, descrição e idades dos principais tipos litológicos do Rio de Janeiro, segundo Heimboldt et.al. (1965), extraído de Barroso (1994).	33
Tabela 2.5 – Caracterização macroscópica de alteração das principais variedades de gnaiss de Rio de Janeiro; extraído de Barroso (1993).	38
Tabela 3.1 – Constantes elásticas das rochas; Vallejo (2002).	46
Tabela 3.2 – Variação dos módulos com o intemperismo em um monzonito da Bulgária, Iliev (1966); Sertã (1986).	49
Tabela 3.3 – Ensaios <i>in situ</i> para determinar a deformabilidade dos maciços rochosos; Vallejo (2002).	53
Tabela 3.4 – Lista de algumas equações empíricas sugeridas para estimar o módulo; modificado de Gokceoglu, 2003.	56
Tabela 4.1 – Valores usados para a análise de sensibilidade; Hess 1996.	74
Tabela 5.1 – Valores usados para o cálculo da pressão transmitida ao aço.	93
Tabela 5.2 – Valores usados para o cálculo da pressão transmitida à rocha pelo pressômetro.	94
Tabela 7.1 – Magnitude e orientação das tensões principais obtidas no morro Dona Marta; Hees (1996).	122
Tabela 7.2 – Valores de deslocamento obtidos na fase de pressurização do ensaio PUC-2 local A-PUC.	135
Tabela 7.3 – Valores dos módulos de deformabilidade obtidos para os maciços rochosos ensaiados.	136
Tabela 7.4 – Valores dos módulos de deformabilidade e de elasticidade obtidos para os maciços rochosos ensaiados.	136
Tabela 7.5 – Classificação do grau de intemperismo dos maciços rochosos	

ensaiados.

137

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

139

Lista de Símbolos

Romanos

a	Raio interno do cilindro de aço
b	Raio interno do cilindro de borracha
c	Raio externo do cilindro de aço
c_r	Raio externo da rocha considerada infinita
d	Comprimento dos transdutores
E	Módulo de elasticidade
E_a	Módulo de elasticidade do aço
E_a	Módulo de elasticidade da borracha
E_o	Módulo de elasticidade da rocha sã
E_w	Módulo de elasticidade da rocha alterada
E_t	Módulo de elasticidade tangente
E_m	Módulo de elasticidade médio
E_m	Módulo de deformação do maciço rochoso
E_s	Módulo de elasticidade secante
I_e	Índice de elasticidade
I_{mn}	Vetor deslocamento nas coordenadas m e n
I_r	Índice de resistência
I_s	Índice de cisalhamento
f	Fator de forma
G	Módulo cisalhante
G_a	Módulo de cisalhamento do aço
G_b	Módulo de cisalhamento da borracha

G_c	Módulo cisalhante circunferencial
GSI	Índice de resistência geológica
G_r	Módulo cisalhante radial
K	Módulo de Bulk
li	Comprimento inicial
lf	Comprimento final
M_c	Módulo de rigidez do material
p_a	Pressão transmitida à parede interna do cilindro de aço
p_b	Pressão interna aplicada no cilindro de borracha
p_c	Pressão externa
P_0	Resultante das tensões
P_m	Sistema de coordenadas iniciais entre dois pinos
Q	Pressão interna
Q	Índice de qualidade (classificação Q de Barton <i>et al.</i>)
r	Radio
RMR	Rock Mass Rating
RMI	Rock Mass Index
RQD	Rock Quality Determination
R	Raio interno do furo central
S_0	Resistência ao cisalhamento da rocha sã
S_w	Resistência ao cisalhamento da rocha alterada.
R_0	Resistência à compressão simples da rocha sã
R_w	Resistência à compressão simples da rocha alterada
u_r	Deslocamentos radiais
u_q	Deslocamento angular

X_m Sistema de coordenadas iniciais no ponto m

Y_m Sistema de coordenadas iniciais no ponto m

Gregos

α Ângulo entre o vetor I_{mn} e a direção positiva do eixo x

β Ângulo entre a foliação da rocha e a direção de carregamento

Δl Variação de distância ou espaço entre duas partículas

ΔL Deslocamento entre dois pinos

ΔV Variação de Voltagem

ΔQ Variação da pressão interna

d Vetor de leituras de campo

dA Área infinitesimal ao redor de um ponto

dF Resultante das forças exercidas em uma área infinitesimal

dP Pressão hidrostática

dV Variação de volume

dmn Pequenas variações de distância

e Deformação

e_{axial} Deformação axial

e_x Deformação na direção x

e_y Deformação na direção y

e_z Deformação na direção z

j Ângulo entre a direção principal maior e o eixo x

Λ_c Vetor de deslocamento circunferencial

Λ_r Vetor de deslocamento radial

q Coordenada polar

g Deformação cisalhante

l_a	Parâmetro de Lamé do aço
l_b	Parâmetro de Lamé da borracha
s	Tensão
s_{axial}	Tensão axial
s_c	Resistência à compressão simples
s_x	Tensão aplicada na direção x
s_y	Tensão aplicada na direção y
s_z	Tensão aplicada na direção z
s_p	Tensão de pico
s_y	Tensão de escoamento
s_1	Tensão principal maior
s_2	Tensão principal menor
t	Tensão tangencial
u	Coeficiente de Poisson
u_a	Coeficiente de Poisson do aço
u_b	Coeficiente de Poisson da borracha
u_r	Coeficiente de Poisson da rocha
Ψ	Deformação angular

1

Introdução

1.1.

Generalidades.

O conhecimento das tensões e das deformações que pode chegar a suportar um maciço rochoso diante determinadas condições permite avaliar seu comportamento mecânico com vistas ao projeto de estruturas e obras de engenharia, as quais modificam o estado de tensões, ocasionando a liberação e redistribuição das tensões entre a matriz rochosa e as estruturas.

As constantes de deformação de um material são os parâmetros mais importantes em qualquer projeto e a sua determinação envolve técnicas de medida de carregamento e deformação. A quantidade de deformação que as rochas geralmente sofrem é extremadamente pequena e suas medidas requerem técnicas especiais.

A deformação do maciço rochoso é calculada mediante os valores do módulo de deformabilidade obtidos através de ensaios laboratoriais em amostras de rochas. Em geral os resultados dos ensaios de laboratório não representam as propriedades *in situ* de todo o maciço rochoso, limitações que têm levado ao desenvolvimento de vários métodos de campo.

Neste trabalho foi desenvolvida uma metodologia para a determinação do módulo de deformabilidade e o estado de tensões *in situ* em maciços rochosos submetidos a diferentes estágios de alteração.

A pesquisa foi desenvolvida com base nos trabalhos apresentados por Galybin *et al* (1997) para a determinação do módulo de deformabilidade e o estado das tensões.

1.2.

Objetivos da Pesquisa

Os principais objetivos deste trabalho foram:

1. Avaliar o funcionamento do pressômetro como uma ferramenta para determinar o módulo de deformabilidade de maciços rochosos.

2. Conceber um sistema de instrumentação que permita monitorar a resposta da rocha a solicitações de carregamento (em caso de determinação da deformabilidade) e descarregamento (em caso de medição de tensões *in situ*).
3. Avaliar a variação do módulo de deformabilidade dos maciços rochosos com relação ao grau de intemperismo.
4. Determinar o estado das tensões *in situ* do maciço.

1.3.

Organização do Trabalho

O presente trabalho foi dividido em 8 capítulos. O Capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica dirigida à coleta de informações sobre o intemperismo, conceitos, tipos, fatores de formação e variação das propriedades geotécnicas com o grau de intemperismo.

Reportam-se também os aspectos geológicos do Rio de Janeiro enfocando-se principalmente suas características geológicas regionais e a morfologia dos perfis de intemperismo das rochas mais comuns.

No capítulo 3 encontra-se a revisão bibliográfica referente aos parâmetros de deformabilidade e o estado de tensões dos maciços rochosos, comenta-se os fatores que influenciam a deformabilidade, técnicas de determinação em campo e laboratório e se fazem alguns comentários sobre as tensões *in situ* e sua determinação.

O capítulo 4 descreve os trabalhos desenvolvidos anteriormente relacionados com o tema de pesquisa, fundamentos teóricos, hipótese adotada e formulação matemática empregada para a determinação dos parâmetros mecânicos.

O capítulo 5 apresenta o procedimento experimental adotado para o desenvolvimento de toda a instrumentação, partes e protótipos até chegar ao modelo final. Também é descrito a metodologia empregada para a calibração dos equipamentos.

No capítulo 6 é apresentada a metodologia de instalação, montagem e execução dos ensaios, além de fazer uma breve descrição dos equipamentos adicionais usados em campo.

No capítulo 7 são relatados os ensaios executados e são discutidos os resultados obtidos.

No Capítulo 8 são apresentadas as principais conclusões obtidas neste estudo e algumas sugestões para pesquisas futuras.

2

Perfis de Intemperismo

2.1.

Introdução

As mudanças bruscas de temperatura, a umidade do solo e a constante atividade dos seres vivos tende a modificar as rochas. Este processo de modificação é o que se chama de *intemperismo*, e se define como as mudanças bruscas que acontecem nos minerais e as rochas perto da superfície da Terra por efeitos da atmosfera, água, plantas e da vida animal (Judson, 1996).

2.2.

Conceito de Intemperismo

Para dar um conceito claro do que é intemperismo, e de como este processo afeta às rochas deve-se começar pela definição do termo alteração.

O termo alteração deve ser entendido como qualquer modificação experimentada por uma rocha, seja de ordem física, química ou biológica e, ainda podem ser de domínio endógeno e exógeno. (Barroso, 1994).

Os principais tipos de alteração que afetam as rochas são a alteração primária e a alteração meteórica ou secundária, na qual se encaixa a alteração intemperica ou intemperismo (Judson, 1996).

2.3.

Tipos de Intemperismo

2.3.1.

Intemperismo Mecânico

É um processo em que as rochas se quebram em pequenos fragmentos como resultados da energia desenvolvida pelas forças físicas, ocorre em regiões de clima árido, semi-árido, quente e frio (Texeira, 2000).

As mudanças de temperatura muito rápidas e elevadas podem provocar o intemperismo mecânico da rocha. O aquecimento rápido e violento da zona exterior da rocha provoca expansão, e se esta é suficientemente grande, podem se desprender pequenas lascas ou fragmentos maiores de rocha.

Por outro lado o gelo é muito mais efetivo que o calor para produzir intemperismo mecânico. A expansão da água à medida que passa do estado líquido ao sólido, desenvolve pressões dirigidas para o lado de fora desde as paredes interiores da rocha. Os fragmentos de rocha intemperizada mecanicamente têm forma angular e seu tamanho depende principalmente da natureza da rocha que procedem (Texeira, 2000).

2.3.2.

Intemperismo Químico

Chamado também de decomposição das rochas, é um processo mais complexo que o mecânico. Caracteriza-se pela reação química entre a rocha e soluções aquosas diversas. Estes processos acarretam no desaparecimento de certos minerais, originando a alteração das rochas e conseqüentemente aparecimento de outros minerais, por precipitação de soluções aquosas que contém produtos solúveis, assim como minerais resultantes da alteração dos originais.

Um outro ponto importante que merece a pena comentar é um processo de intemperismo diferencial que acontece com muita freqüência nos maciços rochosos de Rio de Janeiro. O intemperismo diferencial é o processo por médio do qual, diferentes seções de um maciço rochoso se intemperizam a distintas velocidades. Estas diferentes velocidades de intemperismo se devem principalmente a variações na composição da rocha; uma segunda causa de intemperismo diferencial é simplesmente a variação da intensidade do intemperismo de uma seção a outra na mesma rocha (Judson, 1996).

2.4.

Fatores de Formação.

A composição e textura da rocha de origem são fatores importantes só nos primeiros estágios de intemperismo, pois sua influência decresce com o aumento da duração do intemperismo. Admitindo que diferentes tipos de rochas tenham sido submetidas aos mesmos processos de intemperismo, cada tipo de rocha tem sua curva de alteração no tempo (para uma determinada propriedades física, química, geomecânica ou dinâmica), como mostra a figura 2.1. Nesta figura estão apresentadas três curvas ideais de alterabilidade, para três tipos bem distintos de rocha (Ladeira & Minette, apud Sertã (1986)).

Como pode ser visto pelas curvas (Fig. 2.1), o tempo necessário para que haja alteração total da rocha é muito maior para as rochas ácidas, seguindo-se as neutras e as ultrabásicas, isto é, o tempo de alteração diminui quando diminui a acidez da rocha (Sertã, 1986).

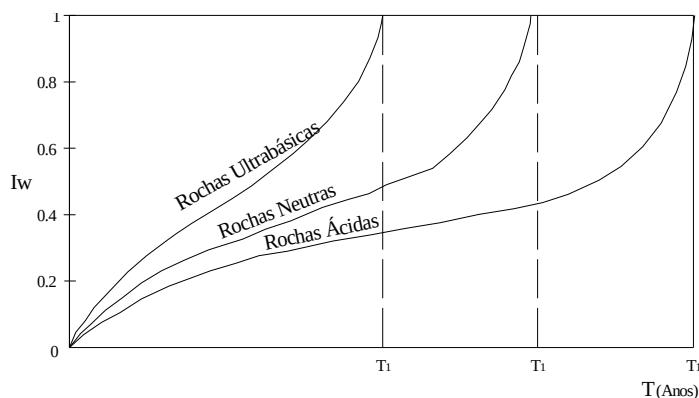


Figura 2.1 – Curvas de alterabilidade de rochas ácidas, neutras e ultrabásicas; Sertã (1984).

Uehara, apud Sertã (1986) sugere que a formação de um tipo de argilomineral formado pelos processos de intemperismo depende da temperatura e da quantidade de chuva. Esse fenômeno explica o aumento da ocorrência de solo lateríticos nas proximidades do Equador já que as fortes precipitações e as elevadas temperaturas favorecem a formação de caolín e óxidos. Sertã (1986) comenta as afirmações feitas por Mitchell (1976) que para uma quantidade de chuva, o processo de intemperismo químico é mais rápido em climas quentes que em climas frios, alias as chuvas intensas erodem o solo e escoam enquanto que as chuvas mais fracas, de longa duração, se infiltram e ajudam na lixiviação.

Uma das características principais do intemperismo é a lentidão com que se desenvolve, com isso, o tempo também é um fator importante na formação dos produtos de alteração. Nos estágios iniciais do intemperismo pode ocorrer a presença de metais alcalinos e alcalino-terrosos e consequentemente desenvolver-se em um determinado tipo de produto de alteração. Depois de um longo período de tempo, os álcalis terão sido removidos por lixiviação e se formarão um outro tipo de produto de alteração, com características diferentes do primeiro. Concluindo, os produtos de alteração de uma determinada rocha são diferentes nos estágios inicial e final do intemperismo (Almeida, 1987).

Em geral nos primeiros estágios do intemperismo há predominância do intemperismo físico, que entre outras alterações, produz uma diminuição do

tamanho das partículas e aumento da superfície útil para um ataque químico. Assim, o intemperismo químico tende a ser mais importante nos estágios finais de alteração (Almeida, 1987).

2.5.

Intemperismo nas Rochas Brasileiras.

Vários autores buscam delimitar zonas que apresentem as mesmas características dentro de um maciço rochoso submetido a um processo de intemperismo, mas na prática não existe zonificação real dentro de um perfil, senão uma mudança gradual das características dos materiais com a profundidade, inclusive é difícil definir de uma forma precisa, o limite da rocha sã com o solo residual ou com a rocha decomposta (Sertão, 1986).

Os sistemas de classificação dos perfis apresentam diferentes estados de intemperismo e separam os perfis verticais em diferentes zonas.

Deere e Patton (1971) definem o perfil de alteração como a sequência de camadas com diferentes propriedades físicas, formadas *in situ* por processos de alteração física e química, e que permanecem recobrando o maciço rochoso. O perfil descrito por eles distingue três zonas: solo residual, rocha alterada e rocha sã.

Barroso (1994) faz um resumo das tentativas feitas por muitos autores ao longo do tempo por zonear os perfis de intemperismo: o autor menciona os trabalhos formulados por Ruxton & Berry (1957) para granitos, também os apresentados por Moye (1955) *et al.* que contribuíram no entendimento do processo de intemperismo dos maciços rochosos. No final da década de 70 e começos de 80 surgiram novas orientações sobre o tema. Dentre estas, destacam-se as recomendações da Geológica Society (1977), ISRM (1981) e IAEG (1981). A ISRM (1981) é uma das mais aceitas (Ver tabela 2.1), sugere um esquema próprio para a classificação de maciços rochosos alterados, a mesma que pode ser modificada e subdividida no caso de situações particulares.

Tabela 2.1 – Esquema para classificação e descrição de maciços rochosos intemperizados (ISRM, 1981).

TERMO	DESCRIÇÃO	CLASSE
SÃ	Nenhum sinal visível de alteração da matriz; talvez leve descoloração ao longo das descontinuidades principais.	I
LEVEMENTE INTEMPERIZADO	Descoloração indica intemperismo da matriz da rocha e de superfícies de descontinuidades. Toda a matriz da rocha pode estar descolorida pelo intemperismo e pode estar algo mais branda externamente do que na sua condição sã.	II
MÉDIANAMENTE INTEMPERIZADO	Menos da metade da matriz da rocha está descomposta e/ou desintegrada a condição do solo. Rocha sã ou descolorida esta presente formando um arcabouço descontínuo ou como núcleos de rocha.	III
ALTAMENTE INTEMPERIZADO	Mais da metade da matriz rochosa está descomposta e/ou desintegrada a condição do solo. Rocha sã ou descolorida está presente formando um arcabouço descontínuo ou formando núcleos de rocha.	IV
COMPLETAMENTE INTEMPERIZADO	Toda a matriz da rocha está descomposta e/ou desintegrada a condição de solo. A estrutura original do maciço está em grande parte preservada.	V
SOLO RESIDUAL	Toda a rocha está convertida em solo. A estrutura do maciço e da matriz da rocha está destruída. Há uma grande variação de volume, mas o solo não foi significativamente transportado.	VI

Oliveira (1996) recomenda usar a classificação proposta por Pastore (1995), para descrição de perfis de intemperismo baseada, sobretudo, na análise de várias proposições existentes no assunto e nos conceitos adotados em 1985 pelo Comitê de Solos Tropicais da ISSMGE. Esta proposição, que tem por objetivo padronizar as descrições de sondagens, escavações e afloramentos, no âmbito da Geologia da Engenharia, caracteriza sete horizontes em um perfil de alteração completo. As figuras 2.2 e 2.3 apresentam perfis de alteração típicos para os tipos de rocha mais comuns em diferentes tipos de relevo (Oliveira, 1996).

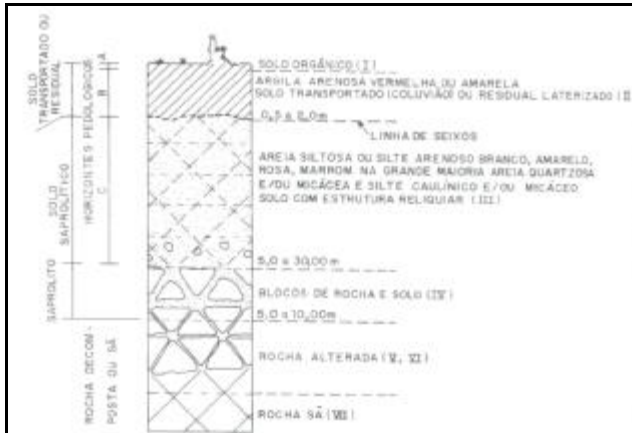


Figura 2.2 – Perfil de Alteração Típico de Rochas Metamórficas e Graníticas em Regiões de Relevo Suave; Pastore apud Oliveira (1995).

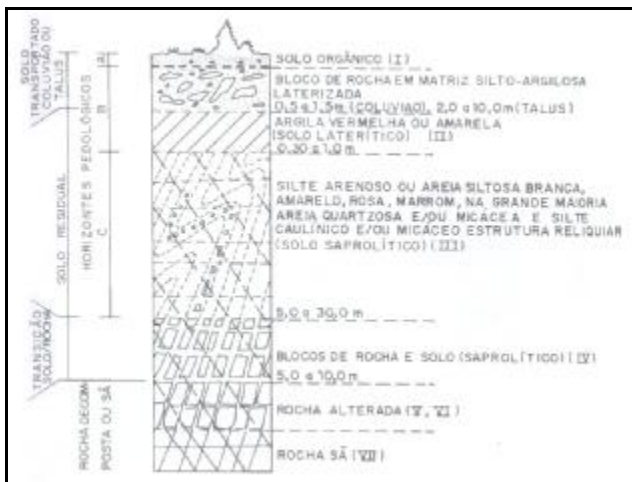


Figura 2.3 – Perfil de Alteração Típico de Rochas Metamórficas e Graníticas em Regiões de Serra; Pastore apud Oliveira (1995).

Melfi *et al.* (1983) estudaram diversos perfis de alteração graníticos de diferentes estados brasileiros, cuja rocha original era formada principalmente por quartzo e feldespato potássico, eles concluíram que em todos os perfis estudados as variações químicas e mineralógicas são extraordinariamente semelhantes, abundância de caulinita formada por alteração do feldespato e pequenas quantidades de smectita e illita em regiões de estação seca pronunciada; em regiões onde predominam as condições climáticas úmidas, a camada de solo saprolítico pode atingir 20 m de espessura de modo que a rocha sã encontra-se somente a 30 m de profundidade. Nessas áreas encontra-se vermiculita e caulinita formadas a partir da alteração da biotita.

2.6.

Variação das Propriedades Geotécnicas com o Intemperismo

As propriedades químicas, físicas e mecânicas variam em uma rocha conforme varia seu grau de intemperismo, em termos gerais pode-se dizer que algumas propriedades aumentam e outras diminuem. Hamrol apud Almeida (1962) menciona que “certo volume de uma rocha é dito ser mais intemperizado que outro volume, da mesma rocha, se as características mecânicas da primeira são mais baixas”, o que deixa claro, que não é suficiente quantificar o grau de intemperismo, é preciso ainda compara-lo como outro estágio de intemperismo do mesmo tipo de rocha para que esta quantificação seja significativa. Esta medida do grau do intemperismo se obtém através dos índices de intemperismo os quais têm sido propostos com base nas propriedades físicas, químicas e mecânicas.

2.6.1.

Índices Físicos

- **Índices de absorção**

Representa a porcentagem de água absorvida pela rocha em relação ao seu peso seco. Para amostras com o mesmo volume e forma, o valor do índice de absorção depende do grau de intemperismo, de forma que quanto maior o grau de intemperismo maior o índice de absorção.

- **Porosidade**

Definida como a relação entre o volume de vazios e o volume total. Conforme aumenta o grau de intemperismo, aumenta a porosidade.

- **Peso Específico**

O peso específico natural é um indicador do grau de intemperismo, uma vez que sofre uma variação significativa com o processo de intemperismo em forma decrescente, porém o peso específico dos grãos não sofre uma variação significativa.

- **Dureza**

A dureza é relacionada com a resistência a compressão simples e o módulo de elasticidade para um grande número de rochas, de modo que, se pode ter uma estimativa desses parâmetros antes da realização do ensaio de compressão simples. A dureza da rocha diminui com o estado de alteração.

Almeida (1987) apresenta os resultados obtidos por Irfam & Dearman (1978) de peso específico aparente seco, índice de absorção, porosidade, velocidade ultrassônica, dureza Schmidt e resistência de ponta para rochas graníticas em 5 estágios de alteração (tabela 2.2).

Tabela 2.2 – Variação dos índices físicos de um granito com o grau de intemperismo (Irfam & Dearman, 1978), extraído de Almeida (1987).

DESCRIÇÃO	GRAU DE INTEMPERISMO		PESO ESPECÍFICO DOS GRÃOS γ_g (g/cm ³)	PESO ESPECÍFICO APARENTE SECO γ_d (g/cm ³)	ÍNDICE DE ABSORÇÃO $I_{QAT}\%$	POROSIDADE EFETIVA $N_{eff}\%$	POROSIDADE TOTAL $N\%$	VELOCIDADE ULTRASSÔNICA (SECO) m/s	RESISTÊNCIA DE PONTA (SECO) Mn/m ²	DUREZA SCHMIDT SHV
GRANITO SÃO	I	SÃ	2.65	2.61	0.13	0.27	1.56	5.400	10.0	64
GRANITO PARCIALMENTE ALTERADO	II _i -iii	Centro inalterado do bloco IIIi	ND	2.61	0.20	0.84	ND	4.940	11.0	65
		Extremidade alterada do bloco IIIi	ND	2.61	0.24	0.91	ND	5.030	10.6	65
		Centro inalterado do bloco IIIi,	2.65	2.58	0.48	1.47	2.45	4.690	9.2	58
		Amostra total, IIIi 90% alterada	ND	2.56	0.92	2.78	ND	4.130	6.5	56
GRANITO COMPLETAMENTE ALTERADO	II _{iv}	Bloco IIiv completamente alterado	ND	2.52	1.24	3.76	4.64	3.750	6.3	52
		Bloco IIiv completamente alterado	ND	2.52	1.32	3.78	ND	3.670	5.2	50
GRANITO FRIÁVEL	III-IV	Centro do bloco III	2.65	2.51	3.37	4.89	5.44	3.100	3.3	48
		Centro do bloco IV	ND	2.33	4.85	9.59		2.300	1.7	39
SOLOGRANÍTICO	V	Solo fracamente cimentado	2.63	2.03	9.6	20.3	22.8	780	0.3	24
		Solo fracamente cimentado	ND	2.00	11.8	20.2	ND	650	0.1	15
		Solo friável intacto	2.62	1.99	11.1	22.1	24.1	ND	-	-
		Solo friável intacto	2.63	1.89	ND	ND	28.1	ND	-	-

2.6.2.

Índices Químicos

Uma particularidade do intemperismo químico é que os novos produtos são estáveis no meio que foram gerados, mantendo-se inalteráveis até que o ambiente mude. Esta particularidade pode ser utilizada como indicador do grau de intemperismo.

Almeida (1987) propõe o trabalho apresentado por Kronberg & Nesbitt (1981) os quais discutiram o intemperismo químico através de um diagrama (ver fig. 2.4), neste diagrama o eixo das abscissas é uma medida do enriquecimento dos óxidos de Al e Si com o processo, representado pela caulinita, gibbsite e quartzo, no eixo das ordenadas é a medida do grau de alteração do feldspato, que é acompanhada pela formação de minerais secundários. Observe-se que a remoção de Na, Mg, K e Ca é representada pelo decréscimo do valor da ordenada, que se aproxima de zero quando os minerais cauliniticos se tornam mais comuns. Com a continuação do processo de decomposição, os minerais cauliniticos devem ser enriquecidos por óxido de alumínio transformando-se em gibbsite, que representa o produto final do intemperismo químico (Almeida, 1987).

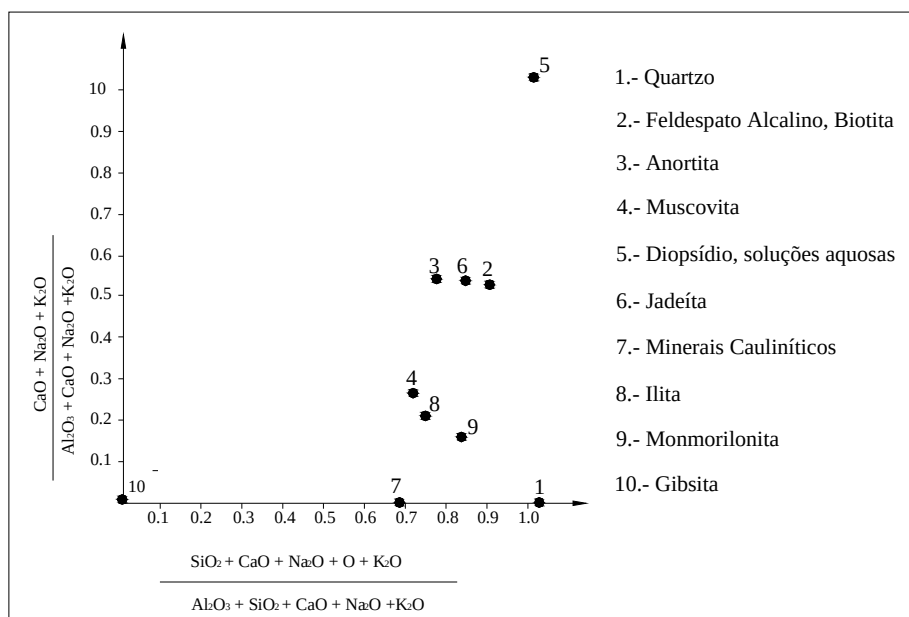


Figura 2.4 – Diagrama de relação do intemperismo químico com respeito à presença de minerais (Kronberg&Nesbitt, 1981); extraído de Almeida,1987).

2.6.3.

Índices Geomecânicos

Os índices geomecânicos fazem referência às propriedades mecânicas da rocha submetida a vários estágios de alteração

- **Índice de Elasticidade**

O índice de elasticidade das rochas (I_e) é dado por:

$$I_e = \frac{E_o - E_w}{E_o} \quad 2.1$$

Sendo:

E_o o módulo de elasticidade da rocha sã,

E_w o módulo de elasticidade da rocha alterada

Este índice varia de 0 a 1, sendo que o valor de zero indica uma rocha sem alteração ($E_w = E_o$) e o valor “um”, indica uma rocha completamente alterada ($E_w = 0$). Em termos gerais pode-se dizer que o módulo de elasticidades das rochas diminui com o grau de alteração.

- **Índice de Resistência**

A resistência de uma rocha diminui com o grau de alteração. O índice de resistência (I_r) é dado por:

$$I_r = \frac{R_o - R_w}{R_o} \quad 2.2$$

Sendo: R_o a resistência à compressão simples da rocha sã,

R_w a resistência à compressão simples da rocha alterada.

O valor deste índice varia de 0 a 1, sendo que o valor zero indica uma rocha sem alteração ($R_w = R_o$) e o valor “um” indica uma rocha completamente alterada ($R_w = 0$).

- **Índice de Cisalhamento**

A resistência ao cisalhamento de uma rocha diminui com o grau de alteração, o índice de cisalhamento é dado por:

$$I_s = \frac{S_o - S_w}{S_o} \quad 2.3$$

Sendo: S_o a resistência ao cisalhamento da rocha sã,

S_w a resistência ao cisalhamento da rocha alterada.

O valor deste índice varia de 0 a 1, sendo que o valor de zero corresponde a uma rocha sem alteração ($S_w = S_o$) e o valor “um”, corresponde a uma rocha completamente alterada ($S_w = 0$).

Almeida (1987) apresenta os valores publicados por Irfan & Dearman (1978) para resistência à compressão simples, módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson, para o granito em cinco estágios de alteração. Esses valores comportam-se de forma decrescente com o processo de intemperismo (tabela 2.3).

Tabela 2.3 – Variação dos parâmetros de deformabilidade de um granito com o grau de intemperismo (Irfan & Dearman, 1978), extraído de Almeida (1987).

DESCRIÇÃO	GRAU DE INTEMPERISMO		RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES (SECO) Mn/m^2	MÓDULO DE ELASTICIDADE TANGENTE $\times 10^4 \text{ Mn/m}^2$	COEFICIENTE DE POISSON (1 CICLO)
Granito são	I	São	282	6.95	0.25
Granito Parcialmente Alterado	$\text{II}_{\text{i-iii}}$	Centro inalterado do bloco II_{i}	288	5.76	0.19
		Extremidade inalterado do II_{i}	283	6.12	0.24
		Centro inalterado do bloco II_{ii}	251	5.19	0.21
		Amostra total, II_{ii} , 90% alterado.	219	4.02	ND
Granito Completamente Alterado	II_{iv}	Bloco II_{iv} completamente alterado	197	3.25	ND
		Bloco II_{iv} completamente alterado	187	2.99	0.19
Granito Friável	III – IV	Centro do bloco III	123	2.28	ND
		Centro do bloco IV	58	1.27	0.27
Solo Granítico	V	Solo Friável Intacto	11	0.15	ND
		Solo Friável Intacto	ND	ND	ND

2.7.

Aspectos Geológicos do Município de Rio de Janeiro

2.7.1.

Geologia Regional

O Rio de Janeiro está localizado em uma área de rochas graníticas e gnáissicas de idade Pré-cambriana, estas estão intruídas por granitos plutônicos alcalinos e rochas intrusivas básicas de idade mais recente (Mesozóico). Estrutural e estratigraficamente a geologia é muito complexa.

O primeiro mapa geológico de Rio de Janeiro foi publicado por Hemboldt *et al.* no ano de 1965. Neste trabalho foi formulada uma série estratigráfica composta por séries metamórficas principais (Série Superior e Série Inferior) cortadas por granitos plutônicos, diques básicos, “stocks” sieníticos e diques alcalinos (Barroso 1994). A tabela 2.4 apresenta um resumo das principais unidades estratigráficas, tipos litológicos e idades, segundo os autores citados.

Tabela 2.4 – Estratigráfica, descrição e idades dos principais tipos litológicos do Rio de Janeiro, segundo Heimboldt et.al. (1965), extraído de Barroso (1994).

IDADES		TIPOS LITOLÓGICOS
TERCIÁRIO CRETÁCEO		Bostonitos Lamprófiros Fonolito Foialito e Umptekito
CRETÁCEO JURÁSSICO		Diabásios ou Diques de Basalto
SILURIANO ORDOVICIANO		Granitos plutônicos, Aplitos e Pegmatitos
PRÉ-CAMBRIANO	SÉRIE SUPERIOR	Microclina gnaisses hololeucocráticos (Leptinitos) Microclina gnaisses com textura facoidal a semifacoidal Kinzigitos Gnaisses chamokíticos Gnaisses calcosilicáticos
		Granodioritos, Quartzodioritos e equivalentes gnaissificados Gnaisses básicos de metamorfismo variado
ARQUEANO	SÉRIE INFERIOR	Gnaisses e intrusões básicas a intermediárias indiferenciadas.
		Aplitos, Pegmatitos e Diabásios metamorfisados. Biotita-hornblenda gnaisses Anfibolitos e Migmatitos

Nas duas últimas décadas, vários autores têm contribuído para melhorar o conhecimento da geologia do Rio de Janeiro. O trabalho apresentado por Pires *et al.* (1994) resume todas estas informações e apresenta uma tentativa de

reinterpretação da geologia da cidade do Rio de Janeiro. O resultado deste trabalho é parcialmente apresentado na figura 2.5.

Barroso (1994) realizou uma descrição macroscópica do Kinzigito o Leptinito e o Gnaiss Augen, que são as variedades de Gnaiss mais comuns que se encontra em Rio de Janeiro.

O kinzigito é uma rocha de cor escura, foliada com biotita, quartzo e matriz de grão fino, rico em plagioclásio, granada, microclina, sillimanita e cordierita. Apresentam dois tipos de texturas: a primeira é de grão fino até médio de natureza inequigranular distribuídas em bandas milimétricas. A segunda é porfiroblástica, com grãos maiores de quartzo e biotita.

O Gnaiss augen é uma rocha com tamanho de grão fino até médio, principalmente composto por microclina (cristais bem desenvolvidos), e uma matriz fina de plagioclásio, biotita, quartzo, granada, minerais opacos e microclina (baixas quantidades). Este tipo de rocha apresenta três tipos de texturas: laminar, augen e semi-augen, e granuloblástica.

Os leptinitos são gnaisses leucocráticos com grão fino até médio, escassamente folheado, sendo comumente encontrado com textura grosseira ou cortado por pegmatitos e aplitos. Sua mineralogia é bastante pobre composta por quartzo, feldspatos alcalinos, plagioclásio, e quantidades menores de biotita e granada.

Geomorfologicamente, a feição característica da paisagem do município do Rio de Janeiro é constituída por morros que se elevam bruscamente quase sem transição da planície. Esse aspecto característico do município é resultado da reunião de diversas ilhas com o continente pelas planícies quaternárias. As ilhas se formaram das partes mais elevadas de um bloco afundado, parte da Serra do Mar; as planícies quaternárias se formaram pelos detritos da Serra do Mar e das próprias ilhas (Britto, apud Sertã (1986)).

O relevo resultante está ligado às características das rochas, ou seja, resistência à desagregação, presença e número de diaclasas, direção e mergulho das camadas nas rochas metamórficas; as condições climáticas e a cobertura vegetal.

As rochas básicas, como diabásios e basaltos sofreram uma decomposição química intensa, seguindo-lhes as biotitas-gnaisses (Sertã, 1986).

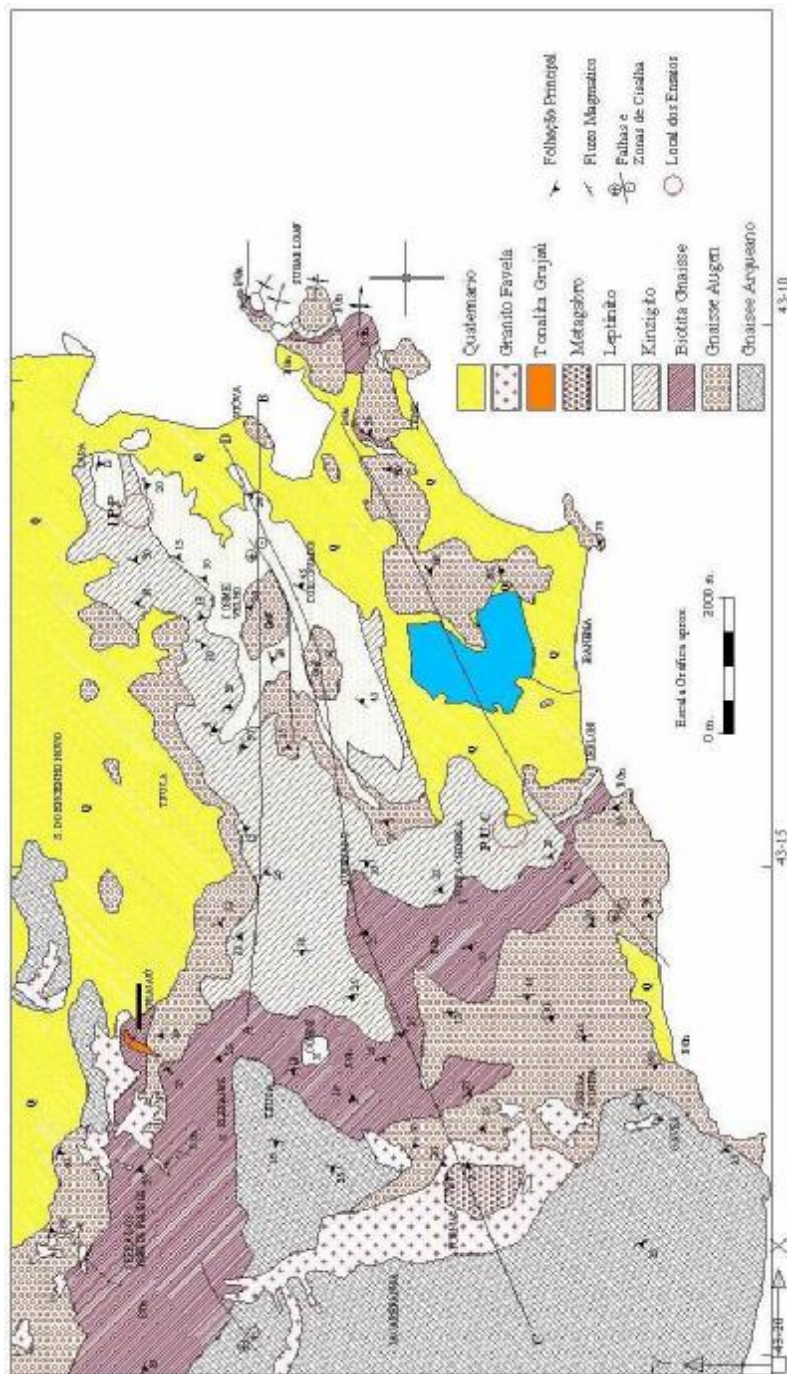


Figura 2.5 – Mapa Geológico do SE do Rio de Janeiro. Pode-se verificar a ocorrência de todos os Gnaisses da Série Superior; Pastore (1995), extraído de Barroso 1994.

2.7.2.

Morfologia típica de perfis de intemperismo em Gnaisses do Rio de Janeiro

Barroso (1994) apresentou uma descrição detalhada dos perfis de intemperismo das rochas gnáissicas do Rio de Janeiro. Algumas das suas características particulares serão descritas a seguir.

2.7.2.1.

Perfil de intemperismo do Kinzigito

Em geral a seqüência completa de material alterado é bastante rara. Os perfis de intemperismo destas rochas estão caracterizados pela presença de camadas de solo bastante espessas (constituem as maiores camadas de solo residuais de Rio de Janeiro) e pelo contato abrupto de materiais rochosos com diferentes graus de intemperismo. Na figura 2.6 é mostrada uma seção transversal de um talude da “Vista Chinesa” onde todos esses aspectos são mostrados.

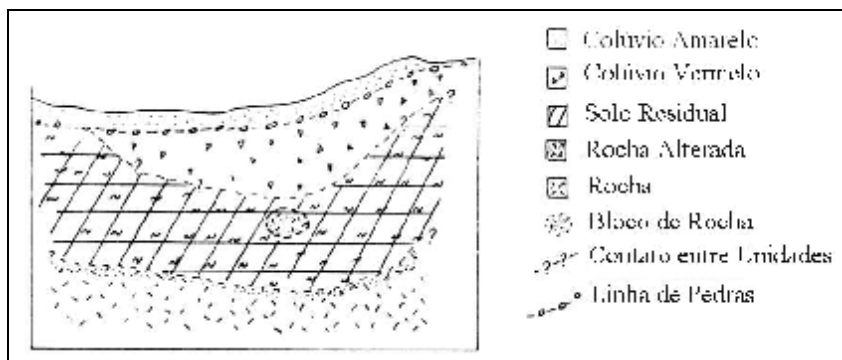


Figura 2.6 – Seção transversal nos materiais da Vista Chinesa; Barroso (1993).

2.7.2.2.

Perfil de intemperismo do Gnaiss Augen

Os perfis de intemperismo deste tipo de rocha estão caracterizados pela presença de graus variados de alteração da matriz na frente do intemperismo das rochas, por apresentar também blocos de rocha envolvidos por massa de solo residual e finalmente pela influência de controles estruturais, como pode ser visto na figura 2.7. Na realidade as estruturas geológicas são os contatos entre rochas em diferentes estágios de intemperismo.

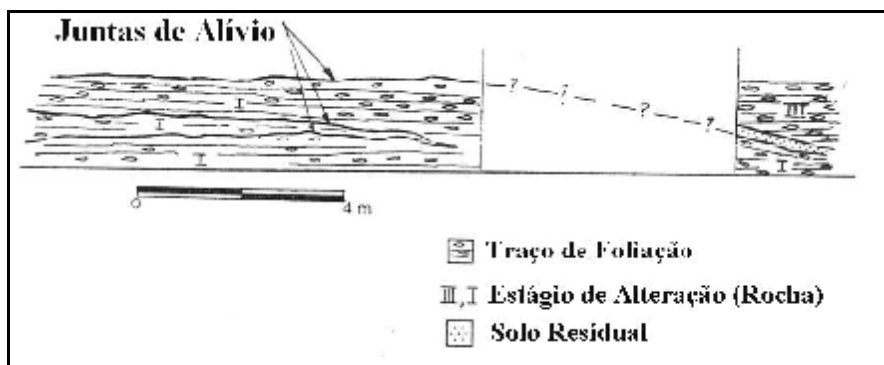


Figura 2.7 – Influência do controle estrutural em um perfil de intemperismo de um Gnaisse Augen; Barroso (1994).

2.7.2.3.

Perfil de intemperismo do Leptinito

No caso do leptinito as descontinuidades estruturais jogam um importante papel no desenvolvimento da morfologia dos perfis de intemperismo. Juntas de alívio ocasionam um zoneamento com uma marcada tendência de redução da intensidade do intemperismo com a profundidade. Este comportamento é influenciado pela densidade e direção das fraturas: quanto mais fraturada a rocha esteja, o intemperismo é mais complexo.

2.7.3.

Classificação dos Maciços Rochosos Intemperizados

Existe uma série de classificações propostas por vários autores para classificar a intensidade e grau de intemperismo das rochas, entre elas destacam-se as classificações da Geological Society (1977), ISRM (1981), IAEG (1981) e mais recentemente Pastore (1995).

Barroso (1994) menciona dificuldades para a aplicação do esquema proposto pela ISRM (1981) para a classificação e descrição dos maciços rochosos do Rio de Janeiro, principalmente na definição das zonas “moderadamente intemperizada” e “altamente intemperizada” por quanto que há uma tendência de super-estimação da primeira classe em detrimento da segunda, além disso a rocha intacta original sofre modificações que individualizam grupos cujas intensidades de intemperismo são distintos uns com outros.

Por este motivo para a classificação dos maciços rochosos ensaiados nesta pesquisa optou-se pela utilização das tabelas de caracterização macroscópica da matriz de alteração desenvolvidas por Barroso (1993) para as variedades mais comuns de gnaiss (kinzigito, gnaiss augen, leptinito). Estas tabelas foram

elaboradas em base a testes feitos na matriz rochosa; as respostas da matriz foram padronizadas e sintetizadas na tabela 2.5.

Tabela 2.5 – Caracterização macroscópica de alteração das principais variedades de gnaiss de Rio de Janeiro; extraído de Barroso (1993).

ESTÁGIO DE ALTERAÇÃO	GNAISSE FACOIDAL	LEPTINITO	KINZIGITO
ROCHA Sã (I)	Todos os minerais esta íntegros perante a observação macroscópica, apenas os feldspatos podem estar com o brilho levemente reduzido. A rocha rompe com extrema dificuldade, necessitando-se de mais de um golpe com o martelo para lascá-la ou quebrá-la. Neste estágio a rocha não pode ser escavada manualmente. Com o uso do canivete pode-se, apenas, arranhar os minerais mais macios como a biotita. Não se consegue arrancar nenhum mineral do arcabouço da rocha.	Os minerais apresentam-se sem alterações perceptíveis, eventualmente os feldspatos podem estar com o brilho levemente reduzido. São necessários vários golpes do martelo geológico para quebrar a rocha. Não é possível escava-la manualmente. Apenas a biotita pode ser arranhada pelo canivete. Nenhum mineral pode ser arrancado do arcabouço da rocha. Os testemunhos NX obtido no laboratório não podem ser quebrados com as mãos.	Os minerais mantêm seu brilho, cor e dureza original. Não é possível retirar grãos ou escavar a matriz rochosa.
LEVEMENTE INTEMPERIZADA (II)	Os feldspatos perdem seu brilho, enquanto as biotitas e granadas apresentam uma acentuada redução do mesmo e da cor original. A rocha pode ser quebrada com diversos golpes de martelo geológico, não sendo possível escava-la manualmente. As granadas já podem ser arranhadas com dificuldade pelo canivete, embora nenhum mineral possa ser arrancado da rocha.	Os feldspatos, biotitas e granadas mostram redução do brilho vítreo original. As biotitas e as granadas sofrem também mudança de cor. A primeira torna-se acinzentada e a segunda ocre. A rocha é quebrada com diversos golpes do martelo geológico. Não é possível escavá-la manualmente com o auxílio de pás ou espátulas. As granadas e os feldspatos têm sua dureza reduzida, é possível risca-los com dificuldade pelo canivete. Apenas a biotita pode ser eventualmente arrancada da rocha. Testemunhos NX não são quebrados como as mãos.	Os feldspatos perdem parte de seu brilho. Biotitas e granados poderiam se apresentar medianamente oxidados. É possível retirar grãos da matriz rochosa.

Continua tabela 2.5.

ESTÁGIO DE ALTERAÇÃO	GNAISSE FACOIDAL	LEPTINITO	KINZIGITO
MODERADAMENTE INTEMPERIZADAS (III)	Os feldspatos apresentem-se totalmente descoloridos e, eventualmente argilizados na superfície. Biotitas e granadas apresentam acentuada alteração da cor, sendo que esta última possui claros sinais de oxidação. A ponta do martelo geológico produz entalhe na rocha, que ainda não pode ser escavada manualmente. Feldspatos, biotitas e granadas são arranhados pelo canivete, os dois últimos mais facilmente. Neste estágio algumas biotitas e granadas já podem ser arrancadas da matriz.	Os feldspatos estão descoloridos e argilizados na superfície. Biotitas e granadas revelam acentuada mudança de cor e claros sinais de oxidação. A ponta do martelo geológico produz entalhe raso na superfície da rocha, não sendo possível escavá-la manualmente. Com exceção do quartzo, todos os minerais são riscáveis pelo canivete, biotitas e granadas mais facilmente. Testemunhos Nx não são quebrados com as mãos.	A transformação de feldspato em argila é mais intensa em superfície. A rocha é muito friável e poderia ser facilmente escavada com a mão. Grãos podem ser retirados da matriz sem dificuldade. Óxidos de ferro produto da alteração dos granados e biotitas estão presentes e poderia criar partes duras. É possível escavar a matriz rochosa com um canivete.
ALTAMENTE INTEMPERIZADA (IV)	A exceção do quartzo, todos os minerais estão alterados. As granadas estão muito oxidadas e argilizadas. Os feldspatos apresentam-se argilizados em superfície. O golpe do martelo desagrega parcialmente a rocha, e uma pá ou espátula são capazes de escavá-la com grande dificuldade. Todos os minerais, excluindo-se o quartzo, podem ser arranhados pelo canivete, sendo que a granada pode ser arranhada pela unha. O canivete é capaz de produzir um sulco profundo sobre a matriz e grande parte dos minerais podem ser arrancados da amostra.	O único mineral que permanece inalterado é o quartzo. Feldspatos, biotitas e granadas estão argilizados, embora não totalmente. O golpe do martelo produz desagregação parcial da amostra, que neste estágio já pode ser escavada por uma pá ou espátula com grande dificuldade. Todos os minerais, excluindo-se o quartzo, podem ser riscados facilmente pelo canivete. Os minerais já podem ser arrancados pelo canivete. Não se obteve testemunhos Nx neste estágio.	Os feldspatos estão completamente transformados em argilas. Não é possível identificar todos os minerais, mas os grãos de quartzo e de biotita/vermiculita estão envolvidos dentro de uma matriz argilosa fortemente oxidada. Extremamente friável, facilmente escavável pela mão. A matriz rochosa está mais oxidada que em outros níveis de intemperismo.

3

Elasticidade, Deformabilidade e Tensões nos Maciços Rochosos.

3.1.

Introdução.

A deformabilidade é reconhecida como um dos parâmetros mais importantes que governa o comportamento dos maciços rochosos

Vallejo (2002) define a deformabilidade como a propriedade que tem a rocha para alterar sua forma como reposta à ação das forças. Dependendo da intensidade das forças e das características mecânicas da rocha, a deformação será permanente ou elástica, neste último caso o corpo recupera sua forma original quando deixam de agir as forças aplicadas.

A elasticidade é uma propriedade ideal; na prática se um material se comporta elasticamente ou não depende fundamentalmente de três fatores: a homogeneidade, a isotropia e a continuidade.

Isotropia é uma medida das propriedades direcionais do material, onde o material possui propriedades iguais em qualquer direção. Assim, muitas rochas têm uma orientação preferencial das partículas e dos cristais, elas seriam anisotrópicas, e reagiram de maneira diferente às forças aplicadas em diferentes direções dependendo do grau de anisotropia (Vallejo, 2002).

Homogeneidade é uma medida da continuidade física do corpo, por isso em um material homogêneo os constituintes estão distribuídos de tal forma que qualquer parte do corpo tenderá as propriedades representativas de todo o material (Vallejo 2002 *et al*).

A continuidade pode ser tomada como referência para a quantidade de juntas, trincas e espaços entre poros de um corpo rochoso. O grau de continuidade afetará sua coesão consequentemente a transmissão da distribuição de tensões através do corpo (Obert, 1967).

Todas as rochas têm algo de anisótropas, heterogêneas e descontínuas e nenhuma delas é por esse motivo, perfeitamente elástica.

Os métodos para a avaliação da deformabilidade do maciço podem-se classificar em diretos e indiretos. No primeiro incluem-se os ensaios *in situ*, em quanto que no segundo incluem os métodos geofísicos e uma série de correlações empíricas.

Vários autores (Amadei & Stephansson (1997), Vallejo (2002) *et al*) mencionam que os métodos de determinação da deformabilidade mais adequados são os ensaios *in situ*, a pesar dos diferentes métodos não estarem suficientemente estudados para reconhecer o grau de representatividade de todos eles.

Goodman, (1989) discute a utilização do módulo de deformabilidade no lugar do módulo de elasticidade, indicando que as propriedades de deformabilidade englobam deformações recuperáveis e não recuperáveis ou elástica ou não elástica, salientando que quando calculado no trecho virgem da curva de carregamento deve ser considerado como módulo de deformabilidade o que não é feito comumente na prática, além disso, o módulo de elasticidade tem sido obtido na fase de descarregamento.

No descarregamento a inclinação do módulo de deformabilidade depende do carregamento aplicado

3.2.

Constantes Elásticas nas Rochas

3.2.1.

Elasticidade nas Rochas

O comportamento tensão-deformação de um corpo é definido pela relação entre as tensões aplicadas e as deformações produzidas, e faz referência a como se deforma e como varia o comportamento do material rochoso durante a aplicação do carregamento.

As rochas apresentam relações não lineares entre as forças aplicadas e as deformações produzidas a partir de um determinado nível de tensões, obtendo-se diferentes modelos de curvas σ - ϵ para os distintos tipos de rochas.

Farmer (1968) divide o comportamento tensão deformação das rochas em três tipos: um comportamento *quase elástico*, apresentado por rochas massivas, compactas e de grão fino. Estas rochas (ígneas hipoabissais, extrusivas e algumas metamórficas de grão fino) aproximasse de certa maneira as propriedades de um material elástico frágil apresentando um comportamento tensão-deformação quase linear até o ponto de falha (ver figura 3.1.a); as rochas menos elásticas são as

rochas ígneas de grão mais grosso, e rochas sedimentares compactas de grão fino, as quais apresentam porosidade baixa e coesão em níveis razoáveis, estas rochas são chamadas de rochas *semi-elásticas*. Estas rochas apresentam uma relação tensão/deformação no qual a inclinação da curva (que seria equivalente ao módulo de deformabilidade com condições de carregamento definido) decresce com o incremento das tensões (Ver a figura 3.1.b).

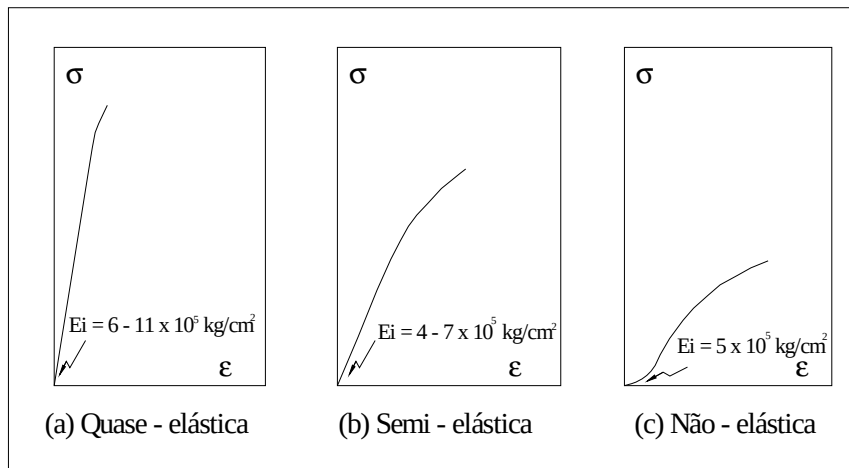


Figura 3.1 – Relações tensão-Deformação das rochas; Farmer (1968).

As *rochas não elásticas* incluem às rochas menos coesivas, com porosidade alta, como as rochas sedimentares de dureza baixa. A curva (conforme figura 3.1.c) geralmente exibe uma zona inicial caracterizada por um incremento da inclinação conforme é aumentado o carregamento o qual indica que a rocha começa passar por um processo de compactação e fechamento das fissuras, antes que ocorra alguma deformação quase linear.

Vallejo (2002), Goodman (1989), Brady & Brown (1994), *et al.* Classificam o comportamento tensão deformação das rochas a partir do que acontece quando o carregamento aplicado supera a resistência de pico (tensão máxima que uma rocha pode suportar em certas condições de carregamento) do material:

Comportamento frágil quando a resistência da rocha diminui drasticamente até valores inclusive próximos de zero (curva 1 da figura 3.2); este comportamento é típico de rochas duras com alta resistência. A fratura frágil implica uma perda quase instantânea da resistência da rocha através de um plano sem nenhuma ou pouca deformação plástica.

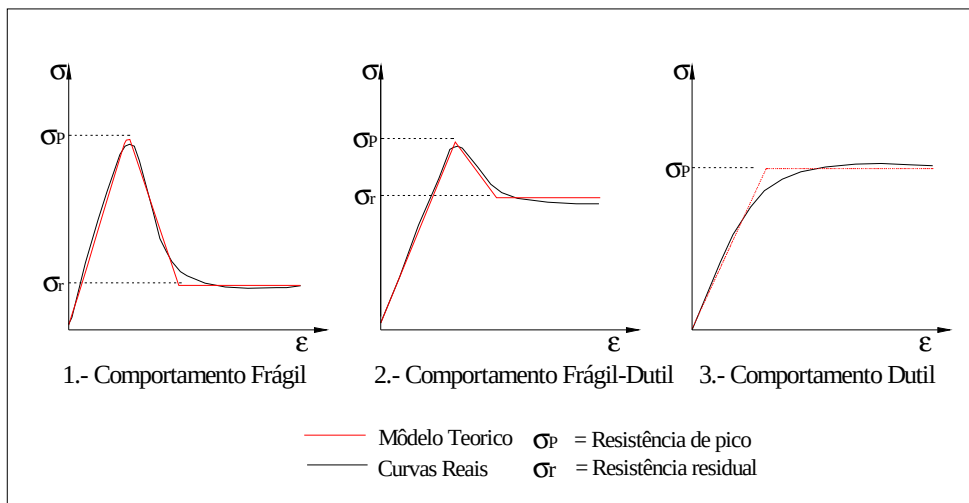


Figura 3.2 – Modelos de comportamento tensão-deformação; Vallejo (2002).

No caso de um *comportamento frágil – dútil* ou parcialmente frágil, a resistência decresce até certo valor, depois de ter-se alcançado valores importantes de deformação (curva 2 da figura 3.2), como exemplo tem-se o comportamento que apresentam as descontinuidades rochosas e materiais argilosos pré-adensados.

A deformação continua aumentando sem que aconteça perda de resistência (a resistência mantém-se constante depois de grandes deformações). Este é o caso de *comportamento dútil* (curva 3 da figura 3.2), que se apresentam em determinados tipos de materiais brandos como os evaporitos.

Os principais comportamentos tensão/deformação das rochas podem ser generalizados na forma de uma curva com uma zona aproximadamente linear de inclinação máxima, a qual decresce progressivamente passando a ter um comportamento não linear quando são incrementadas as tensões e a resistência de pico é atingida (figura 3.3).

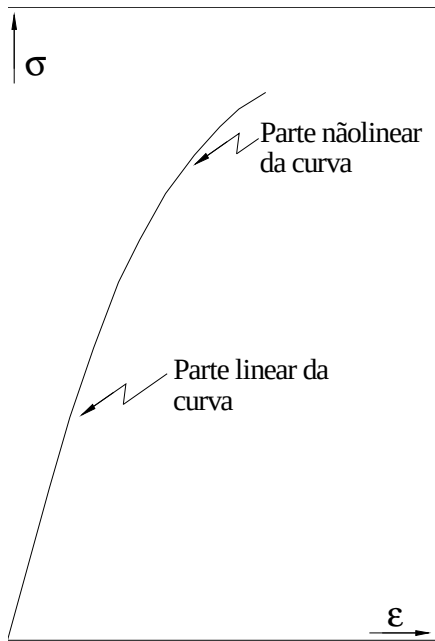


Figura 3.3 – Curva generalizada tensão – deformação para rochas; Farmer (1968).

Esta curva representa o comportamento da rocha quando é submetida a um ensaio de compressão uniaxial ou de compressão simples. No campo elástico (parte mais linear da curva) a deformação é proporcional à tensão como mostra a equação 3.1

$$E = \frac{s_{axial}}{e_{axial}} \quad 3.1$$

Onde E é a constante de proporcionalidade conhecida como módulo de elasticidade, σ_{axial} é a tensão axial aplicada e e_{axial} é a deformação na mesma direção da força aplicada.

Embora a curva possa ser tomada como representativas da fase elástica da rocha, existem dificuldades para obter um valor satisfatório do módulo de elasticidade. O módulo pode ser obtido de três formas:

- a) **Módulo Tangente**, E_t , é a inclinação da curva tensão deformação em uma porcentagem fixa, geralmente 50% da resistência de pico.
- b) **Módulo Médio**, E_m , é dado pela inclinação média da porção linear da curva tensão deformação.
- c) **Módulo Secante**, E_s , é dado pela inclinação da linha reta que une a origem da curva tensão deformação com a resistência de pico.

No campo das deformações elásticas quando se retira a força aplicada recuperam-se as deformações voltando o material a sua configuração inicial. A

partir de um determinado nível de deformações, a rocha não pode manter o comportamento elástico, atingindo um ponto em que começam a produzir deformações dúcteis ou plásticas, e a teoria da relação linear entre a tensão e a deformação se aplica mais.

O ponto em que ocorre uma inflexão da curva tensão deformação, recebe o nome de ponto de escoamento, a resistência desse ponto é chamada de σ_y . A partir desse ponto, a rocha pode ainda manter deformações importantes antes de atingir ao limite da sua resistência. Em rochas frágeis os valores de σ_y e σ_p (tensão máxima que um material pode suportar antes de romper) estão muito próximos e coincidem, o que não ocorre no caso de rochas com comportamento dúctil. A diferença entre ambos valores é muito importante no estudo do comportamento de alguns tipos de rochas, pois indica a capacidade da rocha para seguir suportando cargas uma vez superado seu limite elástico e antes de atingir deformações inadmissíveis (Vallejo (2002), Jumikis (1983) *et al*).

3.2.2.

Constantes Elásticas

Para definir elasticamente um material, pelo menos duas constantes são requeridas das cinco disponíveis: E , ν , l , G , K .

Onde E é o módulo de deformabilidade, ν o coeficiente de Poisson, l o coeficiente de Lamé, G o módulo cisalhante e K o módulo de Bulk.

Na teoria elástica os mais convenientes são G , l , mas em problemas de engenharia onde é requerida uma medida direta de uma rocha quando uma força é aplicada, E e ν são os recomendados. Porém em quase todas as rochas (elásticas ou semi-elásticas), todas as constantes elásticas podem ser relacionadas com um bom grau de precisão.

Vallejo (2002), tomando como base valores de constantes elásticas apresentados por diversos autores (ver tabela 3.1), fez uma compilação de valores de módulos de deformabilidade estáticos e dinâmicos (obtidos através das velocidades de ondas elásticas) e do coeficiente de Poisson para diferentes rochas. Os valores são apresentados em faixas de variação, os quais muitas vezes são amplos devido à alta variabilidade das propriedades físicas (porosidade, estrutura mineral, cimentação, etc.) e o caráter anisotrópico de algumas rochas (presença de

laminação, xistosidade, etc.). Para a maioria das rochas, o coeficiente de Poisson varia entre 0.25 e 0.33.

Tabela 3.1 – Constantes elásticas das rochas; Vallejo (2002).

Roca sã	Módulo de elasticidade estático, E kg/cm ² (x 10 ⁵)	Módulo de elasticidade dinâmico, E_d kg/cm ² (x 10 ⁵)	Coeficiente de Poisson, ν
Andesito	3.0-4.0		0.23-0.32
Anfibolito	1.3-9.2	4.6-10.5	
Anhidrito	0.15-7.6		
Arenito	0.3-6.1	0.5-5.6	0.1-0.4 (0.24-0.31)
Basalto	3.2-1.0	4.1-8.7	0.19-0.38 (0.25)
Calcário	1.5-9.0 (2.9-6.0)	0.8-9.9	0.12-0.33 (0.25-0.30)
Quartzito	2.2-10 (4.2-8.5)		0.08-0.24 (0.11-0.15)
Diabásio	6.9-9.6	6.0-9.8	0.28
Diorito	0.2-1.7	2.5-4.4	
Dolomia	0.4-5.1	2.2-8.6	0.29-0.34
Gabro	1-6.5		0.12-0.20
Gnaiss	1.7-8.1 (5.3-5.5)	2.5-10.5	0.08-0.40 (0.20-0.30)
Xisto	0.6-3.9 (2.0)		0.01-0.31 (0.12)
Granito	1.7-7.7	1.0-8.4	0.1-0.4 (0.18-0.24)
Grauvaca	4.7-6.3	2.3-10.7	
Siltito	5.3-7.5	0.7-6.5	0.25
Foelho	0.3-2.2	1.0-7.0	0.25-0.29
Marga	0.4-3.4	1.0-4.9	
Mármore	2.8-7.2		0.1-0.4 (0.23)
Micaxisto	0.1-2.0		
Filito	0.5-3.0		
Sal	0.5-2.0		0.22
Turfa	0.3-7.6		0.24-0.29
Giz	1.5-3.6		
Valores máximos e mínimos. Valores médios entre aspas. Dados selecionados a partir de Rahn (1986), Johnson e Degraff (1988), Goodman (1989), Walther (1999), Duncan (1999).			

Farmer (1968) menciona que as relações entre E e ν com outras constantes elásticas e físicas tem sido analisadas por Judd e Huber. Estes concluíram que em todas as rochas ensaiadas existe uma relação linear entre o módulo de elasticidade e o módulo de cisalhamento, e entre o módulo de elasticidade e a resistência à compressão uniaxial. Algumas relações entre E e G , E e K , ou ν e G sugerem que se a rocha fosse elástica, então o valor de ν deveria ser constante para todas as rochas independente do valor de E .

O gráfico que relaciona E e ν , apresentado na figura 3.4 mostra que esta afirmação poderia ser aplicável em rochas com módulos de elasticidade bastante

altos, para rochas com módulos de elasticidade baixos (rochas não elásticas) le correspondem valores baixos e variáveis de u . Estas evidências sugerem que a previsão da reação da rocha não deveria basear-se somente na teoria elástica.

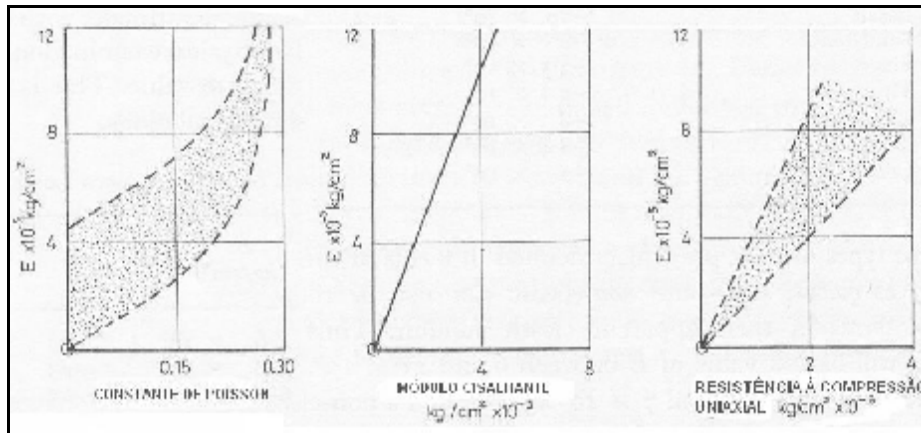


Figura 3.4 – Relação entre o módulo de elasticidade e a constante de Poisson, módulo cisalhante e resistência à compressão uniaxial; extraído de Farmer (1968).

Assim a relação estável-linear entre G e E é aproximadamente $E = 2.5G$, sugerindo um valor constante de u igual a 0.25. Certamente para os trabalhos que envolvem análise elástica das rochas, pode-se assumir na maioria dos casos o valor de 0.25 para o coeficiente de Poisson.

A relação linear que existe entre a resistência compressiva uniaxial da rocha (s_c) e os módulos elásticos E e G , os quais tomam a forma aproximada de $E = 350s_c$ e $G = 140\sigma_c$ respectivamente (segundo os gráficos mostrados na figura 3.4) é importante porque confirma que a resistência da rocha está relacionada à rigidez (representado por E e G) da sua estrutura interna, Farmer (1968).

3.3.

Fatores que Influenciam o Módulo de Deformabilidade das Rochas

O módulo de deformabilidade é influenciado principalmente por: defeitos na rocha (juntas, fissuras, vazios); estrutura petrográfica (resistência interna das partículas minerais individuais; resistência das ligações entre os grãos minerais na matriz rochosa); orientação e mergulho da formação rochosa e das estruturas geológicas que a afetam; grau de intemperismo e alteração da rocha; propriedades elásticas e plásticas; grau de anisotropia; direção e magnitude das cargas atuantes na rocha; grau de compressão ou descompressão; índice de vazios e porosidade; grau de saturação; tempo; estado das tensões (tensões internas) dentro do maciço rochoso. Outros fatores de caráter secundário podem ser: a temperatura; os efeitos

vibratórios; geração de juntas e fissuras produzidas pela detonação (caso escavações ou perfurações na rocha) e fatores sísmicos (Pusch (1995) *et al*).

A influência da gênese da rocha é outro fator importante mencionado por Jumikis (1983). No caso, por exemplo, das rochas intrusivas, de acordo com os valores obtidos por diferentes ensaios, conclui-se que as rochas vulcânicas de composição básica como o basalto tem um módulo de deformabilidade maior que uma rocha ácida como o granito.

Farmer (1968) cita os trabalhos em rochas feitos por Judd and Huber, estes sugeriram com base nos resultados dos testes, a relação quase linear de G e E com a densidade aparente da rocha (ver figura 3.5). Os autores concluíram que como a maioria de minerais formadores de rochas tem similar peso específico, então as propriedades elásticas das rochas são afetadas pela estrutura interna da rocha, especialmente pelo tamanho, grau de compactação e subsequente presença de espaços no interior da rocha.

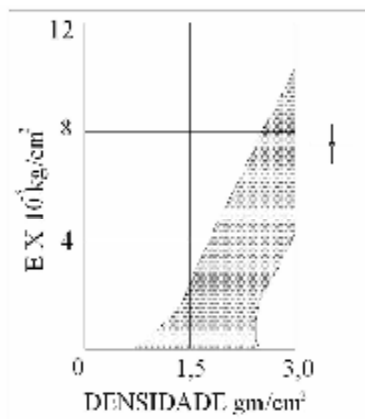


Figura 3.5 – Relação entre o módulo de elasticidade e a densidade (Judd and Huber); Farmer (1968).

O grau de intemperismo afeta de maneira direta ao módulo de deformabilidade, Sertã (1986) menciona os trabalhos feitos por Iliev em 1966 em um monzonito da Bulgária, apresentando resultados onde o módulo de elasticidade e o módulo de deformabilidade decresce com o aumento do intemperismo (Ver tabela 3.2).

Tabela 3.2 – Variação dos módulos com o intemperismo em um monzonito da Bulgária, Iliev (1966); Sertã (1986).

	Rocha Sã	Rocha Alterada
Módulo de Elasticidade (Kg/cm ²)	5 X 10 ⁻⁵	0.64 X 10 ⁻⁵
Módulo de Deformabilidade (Kg/cm ²)	4.3 X 10 ⁻⁵	0.38 X 10 ⁻⁵

Farmer (1968) indica que o efeito da água gera um decrescimento do módulo de deformabilidade, particularmente em rochas porosas. Obert *et al.* (1967) mostra que para rochas porosas como arenitos e calcários saturados, o valor de E decresce entre 20% e 40% que o valor em estado seco. Para foelhos e siltitos o valor se reduz de 0-5%, em quanto que no caso do granito e mármore o valor de E é incrementado em estado saturado em 30%. Porém o conteúdo de umidade é baixo para as quatro últimas rochas.

Jumikis (1983) dá uma explicação razoável para anomalias de deformação em rochas úmidas postulado por Boozar *et al.* (1962) na base do efeito Reh binder (Reh binder *et al.*, 1948). Este postula que todo fenômeno ocasionado pela pressão de poros é causado pela redução da energia da superfície livre existente entre os constituintes da rocha, esta redução é gerada pelo processo de absorção. Em outras palavras, a estrutura coesiva da rocha é enfraquecida pela presença de liquido entre os poros, e desde que os processos de deformação e falha são em grande parte influenciados pela sua coesão elas serão afetadas pela pressão do liquido presente; a resistência e o módulo de deformabilidade decrescerão e a potencialidade do fluxo se incrementará.

3.4.

Determinação dos Parâmetros de Deformabilidade

A caracterização de um maciço rochoso desde o ponto de vista da sua deformabilidade é um dos principais problemas que qualquer estudo geotécnico deve enfrentar caso desejam-se realizar cálculos tensão-deformação para a execução e desenho de estruturas.

Uma amostra de rocha intacta em laboratório é muito menor que um maciço rochoso que, muitas vezes contem certo número de planos de fraqueza. Devido a isso, o comportamento mecânico do maciço rochoso é bastante diferente do material ensaiado no laboratório (Galera *et al.*, 2005). Para determinar os

parâmetros que caracterizam os maciços rochosos têm-se três possibilidades a considerar: estimar os valores *in situ* dos resultados obtidos no laboratório, utilizar correlações empíricas e executar ensaios *in situ*.

Antes de fazer uma revisão das principais técnicas de medida, é necessário lembrar algumas definições básicas que são importantes no momento de escolher alguma técnica de medição.

Matriz Rochosa: é o material rochoso sem descontinuidades, ou blocos de rocha intacta que quedam entre elas. A matriz rochosa ou rocha são apesar de ser considerada contínua apresenta um comportamento heterogêneo e anisotrópico, ligado a sua fábrica e microestrutura mineral.

Descontinuidade: é qualquer plano de origem mecânico o sedimentário que separa os blocos da rocha intacta em um maciço rochoso.

Um maciço rochoso é o conjunto dos blocos da matriz rochosa ou rocha são e das descontinuidades de diversos tipos que afetam o maciço rochoso. Mecanicamente os maciços rochosos são médios descontínuos, anisotrópicos e heterogêneos (Vallejo 2002).

As descontinuidades e os blocos da matriz rochosa constituem em conjunto a estrutura rochosa, e governam o comportamento global do maciço rochoso, predominando um ou outro componente em função das suas propriedades relativas e da escala ou âmbito de estudo do maciço.

A determinação do módulo de deformabilidade da matriz rochosa é feito através de ensaios de laboratório, o mais comum e mais utilizado é o ensaio de compressão simples ou de compressão uniaxial, embora existam outros disponíveis como o teste de ressonância longitudinal, de resistência elétrica, velocidade ultrassônica, etc.

O ensaio de compressão uniaxial se realiza sobre um cilindro de rocha (geralmente testemunho de sondagem), ao que se aplica gradualmente força axial até que se produz a ruptura.

Os valores obtidos dependerão da natureza e condições da rocha (mineralogia, tamanho de grão, cimentação, microfissuração, porosidade, grau de intemperismo) e das condições do ensaio (forma e volume da amostra, preparação da mesma, conteúdo de umidade, temperatura, velocidade de carregamento, direção de aplicação de carregamento, rigidez da máquina do ensaio).

O maciço rochoso é um meio não homogêneo e sobre todo descontínuo cujas propriedades resistentes e deformacionais não podem ser medidas no laboratório já que existe uma diferença muito apreciável entre os valores que se obtém nos ensaios de laboratório e os que se obtém dos ensaios realizados *in situ*, diferença que é conseqüência do volume afetado em cada caso e que é conhecido como efeito escala. O efeito escala é a conseqüência mais importante do caráter heterogêneo e descontínuo dos maciços rochosos. Vallejo (2002) considera que a extrapolação dos resultados em escalas menores que as do maciço só pode-se considerar valida se o volume da amostra ensaiada é representativo do conjunto. Na figura 3.6 se apresenta o efeito escala nos maciços rochoso, ilustrando a variação das amostras como aumento de seu tamanho, envolvendo sucessivamente à matriz rochosa, à matriz e uma única descontinuidade, várias famílias de descontinuidades e ao maciço rochoso como um conjunto.

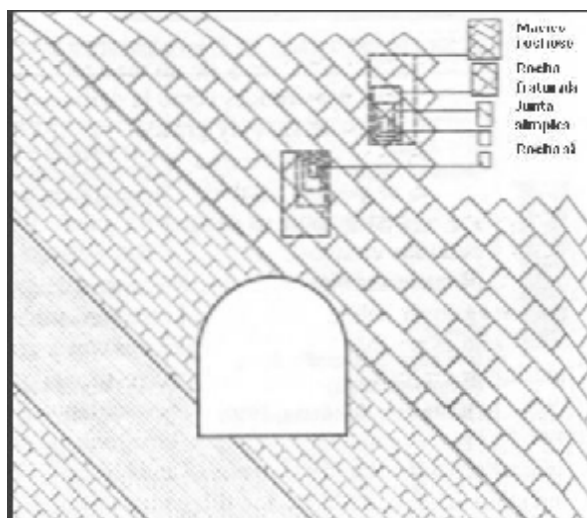


Figura 3.6 – Representação do efeito escala Cunha (1990); extraído de Galera (2005).

Ao nível do ensaio de laboratório, o efeito escala se evidencia quando ao ensaiar amostras do mesmo maciço e de diferentes tamanhos, obtém-se resultados variáveis e dispersos. Na figura 3.7, pode-se observar que a partir de um determinado volume da amostra, os resultados dos ensaios são independentes do tamanho. Este volume o menor considerado representativo do comportamento do maciço rochoso para uma determinada propriedade, é chamado de “volume elementar representativo” (VER) o qual pode variar segundo a propriedade considerada e de um maciço a outro. Na matriz rochosa, o efeito escala se deve à heterogeneidade e variabilidade mineralógica e estrutural. No caso do maciço o VER será função do espaçamento das juntas, pois conforme se considere um

maior volume do maciço rochoso, se permite às descontinuidades tomar um papel mais importante na resistência e deformabilidade (Galera, 2005).

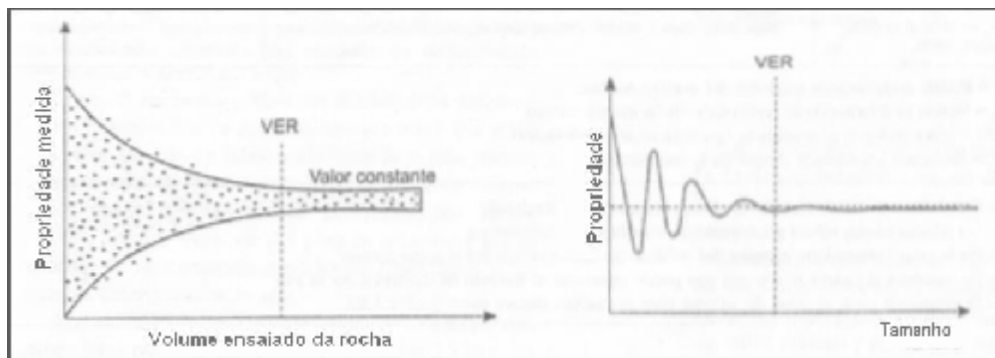


Figura 3.7 - Variação das propriedades das rochas segundo o volume considerado. Geralmente, a dispersão dos valores medidos diminui ao aumentar o tamanho; Vallejo (2005).

A dificuldade de realizar ensaios de compressão a escala real em maciços rochosos e de ensaiar volumes representativos em laboratório determinam os inconvenientes para estimar de forma direta a deformabilidade. Os métodos para a avaliação da deformabilidade do maciço podem-se classificar em diretos e indiretos. No primeiro se incluem os ensaios *in situ*, em quanto que no segundo grupo incluem-se os métodos geofísicos e uma série de correlações empíricas.

3.4.1.

Determinação Direta - Ensaios *In Situ*

Na determinação da deformabilidade *in situ*, existe uma série de inconvenientes relacionadas com a representatividade e extrapolação dos resultados obtidos, entre os que se destacam os referidos à escala do ensaio.

Na avaliação *in situ* da deformabilidade, os ensaios *in situ* podem envolver pequenos volumes como no caso na periferia de um furo de sondagem, ou grandes volumes, como é o caso dos ensaios com macacos planos de grande área (LFJ – Large Flat Jacks).

Para a determinação *in situ* dos parâmetros de deformabilidade em pequena escala, executam-se, normalmente, ensaios em furos de sondagens podendo agrupar-se em dois tipos principais, em função da forma como é aplicada a pressão nas paredes do furo (Sousa *et al.*, 2005):

- Aplicação da pressão por intermédio de uma membrana flexível completamente adaptada às paredes do furo com uma pressão rotacional simétrica como no caso dos dilatômetros. Nestes ensaios,

medem-se, habitualmente, deformações radiais ou diametrais. Englobam-se, também, os pressiômetros nos quais é medida uma deformação volumétrica global. Estes últimos são mais utilizados para rochas brandas e apresentam limitações de precisão já que medem volumes e não deslocamentos.

- Aplicação da pressão através de pratos rígidos em dois arcos de circunferência (macacos de sondagem). Correspondem a situações de carga mais complexas e, por conseqüência, a interpretação dos ensaios reveste-se de maior dificuldade.

As vantagens e desvantagens de alguns dos ensaios disponíveis no mercado são mostradas na tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Ensaios *in situ* para determinar a deformabilidade dos maciços rochosos; Vallejo (2002).

Ensaio	Volume	Lugar	Vantagens	Desvantagens
Macaco Plano (<i>flat jack</i>)	Alguns m ³	Nas paredes de galerias e túneis, etc.	Amostras grandes. Distribuição das tensões conhecida	Custoso. Precisam-se obras especiais. Poucos ensaios.
Carga em placa	Até 1m ³ dependendo do tamanho da placa	Nas paredes de galerias, túneis, poços, etc.	Amostras grandes e pouco perturbadas	Distribuição das tensões mal conhecida. Tem que ser feitas muitas suposições para a interpretação. Custos. Obras especiais. Poucos ensaios.
Dilatômetro	Alguns m ³	Em furos de sondagens.	Pode ser feito em profundidade. É um método bom para obter a distribuição da deformabilidade do maciço em juntas fechadas, Baixo custo.	Amostras pequenas. Distribuição das tensões desconhecida. Requer suposições adicionais.
Macaco Radial	Até 1m ³ dependendo do tamanho do macaco	Em galerias especiais.	Amostra grande muito adequado para galerias a pressão.	Muito custoso. Normalmente só um ensaio é feito.
Triaxial a grande escala.	Alguns m ³	Perto da superfície, em galerias e túneis, etc.	Amostra grande, distribuição de tensões bem conhecida.	Muito custoso. Obras especiais. Muito poucos ensaios.
Modificado de Serrano, 1997.				

Com respeito à influência do tamanho da amostra ensaiada, na figura 3.8 se apresenta os valores de módulos de elasticidade obtidos em ensaios de laboratório e *in situ* (dilatômetro e macaco plano de grande escala). Ao tempo que aumenta o volume ensaiado, e por tanto se considera maior volume de descontinuidades, a dispersão dos resultados e o valor médio de *E* diminuem.

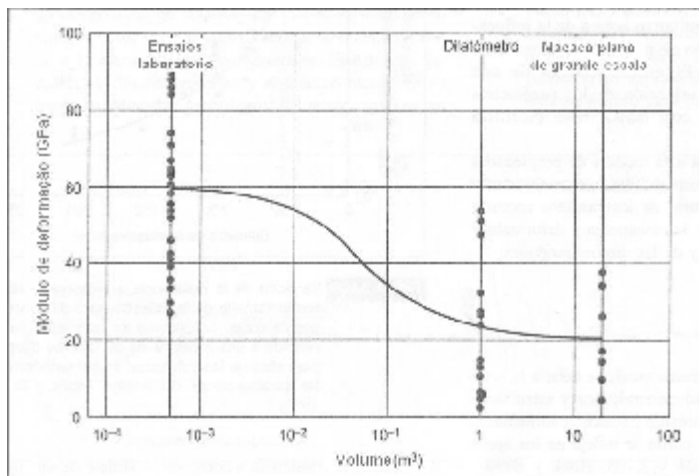


Figura 3.8 – Variação de deformabilidade do maciço rochoso em função da escala considerada; a curva tende estabilizar-se para volumes cerca ao V.E.R (Cunha, 1990); Vallejo (2002).

3.4.2.

Determinação Indireta

3.4.2.1.

Métodos Geofísicos.

Estes métodos permitem estimar a deformabilidade dinâmica do maciço rochoso, e estão baseados nos valores da velocidade das ondas elásticas de compressão ou longitudinais, V_p , e de cisalhamento ou transversais, V_s , através do maciço rochoso. As constantes de deformabilidade estática podem se obter a partir das dinâmicas mediante correlações, as quais em geral são pouco precisas.

A velocidade de propagação das ondas longitudinais depende do tipo de material rochoso, grau de alteração e de fraturamento, do estado das tensões e das condições hidrogeológicas.

O módulo de deformação dinâmico E_d é maior que o determinado a partir de ensaios estáticos *in situ*. Galera *et al.* (2001) fez algumas correlações entre o módulo estático e o módulo dinâmico. A figura 3.9 mostra a correlação obtida por ele entre o módulo estático obtido pelo dilatômetro flexível, e o módulo dinâmico obtido por métodos dinâmicos, esta correlação é dada pela equação 3.2..

$$G_d \text{ (Mpa)} = 10.95G_E \text{ (Mpa)} + 1449 \quad 3.2$$

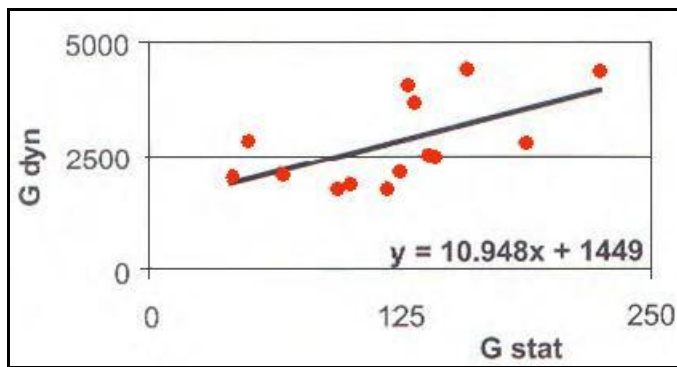


Figura 3.9 – Correlação entre o módulo cisalhante estático e dinâmico; Galera et al. 2005.

Dyskin (1999) menciona que as diferenças entre os módulos estáticos e dinâmicos possam se dever a: baixas amplitudes de onda (magnitudes de tensões baixas) as quais podem dar módulos de deformação menores, taxas de carregamento elevadas associadas com as ondas poderiam incrementar os valores do módulo, ondas ultra-sônicas de baixa amplitude poderiam incrementar os valores do módulo.

Entre as vantagens do método geofísico encontram-se: determinação dos parâmetros em áreas extensas com poucos ensaios permite avaliar as características da rocha em deformações muito pequenas (da ordem de 0,001 por cento) o qual provê informações mais reais das propriedades elásticas da rocha, o relativo baixo custo levando em conta que se podem obter informações de grandes áreas. Entre as desvantagens destacam-se o melhor funcionamento quando há bastante diferença na rigidez dos materiais ensaiados.

3.4.2.2.

Correlações Empíricas

Os ensaios de campo para determinar o módulo de deformabilidade *in situ* diretamente consomem tempo, são bastante custosos e a confiabilidade e grau de exatidão dos resultados destes testes é muitas vezes questionável.

O desenvolvimento de modelos empíricos para determinar o módulo de deformação do maciço rochoso (E_m) tem ido evoluindo e novas propostas vêm aparecendo e sendo desenvolvidas. O primeiro critério empírico para a predição do módulo de deformação do maciço rochoso foi desenvolvido por Bienawski (1978). Depois de Bienawski, outras equações empíricas como Barton (2002), Serafim e Pereira (1983), Nicholson e Bienawski (1990), Mitri (1994) *et al.*, Hoek

and Brown (1997) and Kayabashi (2002) tem sido propostas para estimar o módulo de deformação do maciço rochoso (Tabela 3.4).

Tabela 3.4 – Lista de algumas equações empíricas sugeridas para estimar o módulo; modificado de Gokceoglu, 2003.

Equação empírica	Parâmetros requeridos	Limitações	Equação
Bieniawski	RMR	RMR > 50	$E_m = 2RMR - 100$
Serafim e Pereira	RMR	RMR ≤ 50	$E_m = 10^{(RMR-10)/40}$
Nicholsom e Bieniawski	E_i e RMR	-	$E_m = E_i[0.0028RMR^2 + 0.9\exp(RMR/22.82)]$
Mitri et al	E_i e RMR	-	$E_m = E_i[0.5(1 - (\cos(\pi \cdot RMR/100)))]$
Read et al.	RMR	-	$E_m = 0.1(RMR/10)^3$
Diedrich and Kaiser	RMR	-	$E_m = 7(\pm 3) \sqrt{Q'}$, $Q' = 10((RMR - 44)/21)$
Palmstrom e Singh	RMI	-	$RMI > 0.1$, $E_m = 5.6RMI^{0.375}$ $0.1 < RMI < 301$, $E_m = 7RMI^{0.4}$
Kayabasi et al.	E_i , RQD e WD	-	$E_m = 0.135 \left[\frac{E_i(1 + RQD/100)}{WD} \right]^{1.1811}$
Gardner	RQD	-	$E_m = \alpha_E E_r$, $\alpha_E = 0.0231RQD - 1.32 \geq 0.15$
Barton	Q	-	$E_m = 10Qc^{1/3}$; $Qc = Q \frac{UCS}{100}$
Sonmez et al.	E_i e GSI	$E_i = 50$ Gpa	$E_m = E_i(s^*)^{0.4}$, $s = \exp((GSI - 100)/9)$ $a = 1/2 + 1/6(\exp(-GSI/15) - \exp(-20/3))$, $GSI = RMR$
Carvalho	E_i e GSI	$E_i = 50$ Gpa	$E_m = E_i s^{1/4}$, $s = \exp((GSI - 100)/9)$
Hoek and Brown	GSI e σ_c	$\sigma_c \leq 100$ MPa	$E_m = \sqrt{\frac{UCS}{100}} 10^{(GSI-10)/40}$

As equações propostas por Bienawski (1978), Serafim e Pereira (1983), Nicholson & Bienawski (1990) e Mitri (1994) *et al*, consideram o RMR (Rock Mass Rating), em quanto que a equação de Barton estima o módulo de deformação a partir do valor de Q. A equação proposta por Hoek and Brown que é uma modificação de proposta por Serafim e Pereira esta baseada no índice GSI. (Geological Strength Index), Palmstrom and Singh ademais sugeriram uma equação empírica dependente dos valores do RMI (Rock Mass Index). Kayabasi *et al*. propuseram uma das mais recentes equações empíricas considerando o módulo de elasticidade da rocha s , o RQD (Rock Quality Determination) e o grau de intemperismo para estimar o módulo de deformação do maciço rochoso.

Ainda que as equações empíricas para a estimação indireta do módulo de deformação sejam simples e de baixo custo, estas não estão livres de apresentar

algumas incertezas (disponibilidade limitada dos dados, variabilidade do tipo de rocha, natureza heterogênea do maciço rochoso) pelo que a aplicação destas equações e os resultados obtidos devem ser discutidos, seja para ser aplicados em projetos de engenharia ou para desenvolvimentos futuros de novas correlações.

3.5.

Tensões em Maciços Rochosos

O conhecimento do estado de tensões em maciços rochosos é de fundamental importância em diversos problemas nos campos da engenharia civil, mineira e do petróleo, assim como também na geologia e geofísica. Em geral, problemas relacionados com as tensões se incrementam com a profundidade, mas escavações a pouca profundidade poderia ser problemática também devido às altas tensões horizontais ou à sua não consideração. (Amadei and Stephansson, 1997).

As tensões *In situ* podem ser divididas em tensões naturais, também chamadas primitivas ou virgens, e tensões induzidas. As tensões naturais são aquelas que existem nas rochas por efeito de algum tipo condicionante anterior, como por exemplo, efeito gravitacional, estrutural, etc. Por outro lado as tensões induzidas estão associadas com perturbações artificiais (escavação, perfuração, etc.) na figura 3.10 se mostra a influência da escavação na distribuição das tensões *in situ*.

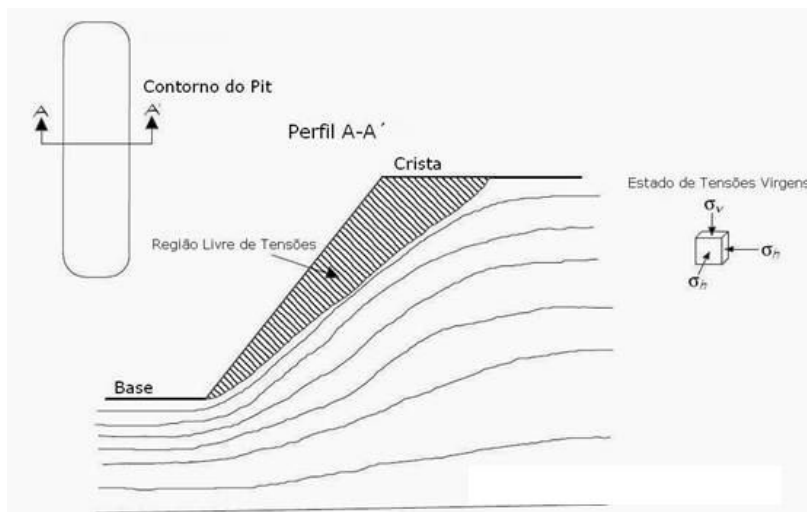


Figura 3.10 – Influência da escavação na distribuição das tensões *in situ*.

As tensões virgens podem ser divididas em tensões gravitacionais (devido ao peso da coluna da rocha sobrejacente), tensões tectônicas e tensões residuais.

As tensões gravitacionais resultam do peso da coluna da rocha sobrejacente por unidade de área em um ponto específico no maciço rochoso. A componente de tensão vertical σ_v é normalmente assumida como uma função da profundidade e é definida conforme a equação 3.3.

$$s_v = gz \quad 3.3$$

Sendo g o peso específico e z a profundidade ou espessura do material, o valor do peso específico é da ordem de 0,0027 MPa/m seguindo um comportamento linear com a profundidade (Hoek & Brown, 1980).

Esta tensão compressiva vertical origina tensões laterais horizontais devido às rochas tenderem a se expandir em direções transversais com relação aos carregamentos verticais. Como já foi visto nas seções anteriores em corpos elásticos a expansão transversal pode ser expressar pelo coeficiente de Poisson n (conforme a equação 3.4)

$$u = \frac{e_t}{e_l} \quad 3.4$$

Onde e_t a deformação transversal e e_l a deformação longitudinal. Se a rocha não é livre de se expandir transversalmente ($e_t = 0$) cria-se uma tensão transversal cujo valor é dado pela equação 3.5, (Vallejo, 2002).

$$s_{transversal} = s_H = \left(\frac{u}{1-u} \right) s_v \quad 3.5$$

Considerando um valor médio do coeficiente de Poisson $n = 0,25$, a relação $k = s_H/s_v$ vale aproximadamente 0,33.

$$s_H = \left(\frac{u}{1-u} \right) s_v = k s_v = 0,33 s_v \quad 3.6$$

As tensões de origem tectônica estão associadas aos diversos ambientes e fenômenos que ocorrem com o movimento relativo das placas litosféricas (na suas bordas e no seu interior). As tensões tectônicas podem ser *ativas* (devido ao continuo movimento das placas), e *remanescentes* (devido a eventos tectônicos passados os quais têm sido parcialmente ativados por processos naturais) (Amadei e Stephanson, 1997). A origem e a orientação das tensões são mostradas na figura 3.11. Finalmente, as tensões residuais são definidas como o estado de tensões que permanece no maciço rochoso ainda depois que o mecanismo original tenha deixado de existir (Hyett *et al.*, apud Hees, 1986).



Figura 3.11 – Origem e orientação das tensões tectônicas segundo Zoback et al. (1989), extraído de Amadei (1997).

As tensões induzidas são o resultado da redistribuição das tensões primárias devido á perturbação. A perturbação pode ser natural, como por exemplo, uma mudança nas condições do meio ou causada por atividades humanas (escavação, bombeio ou extração da energia) (Jumikis, 1983).

As condições geológicas e morfológicas em uma zona podem modificar os campos tensionais gravitacionais e a direção e magnitude das tensões, originando anisotropias tensionais, ou estado de tensões anisótropas principalmente devido aos seguintes fatores: presença de falhas, dobras, diques e outras anisotropias estruturais; processos diversos de carregamento ou descarregamento de materiais como a erosão, sedimentação, processos glaciais, etc.; vales profundos e zonas de releve acidentado e processos vulcânicos (Vallejo, 2002). Na figura 3.12 são representados algumas destas condições.

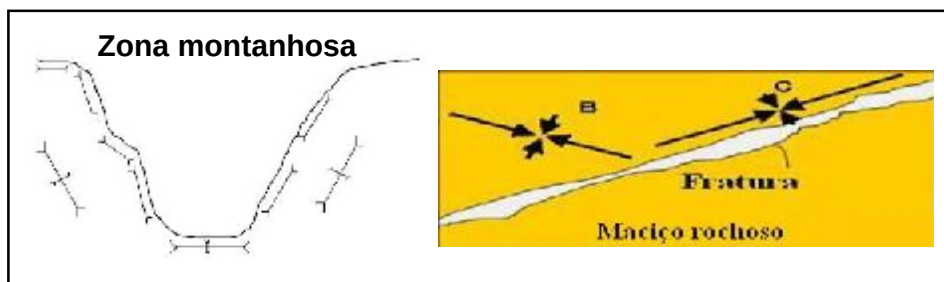


Figura 3.12 – Influência da morfologia e das estruturas geológicas no estado de tensões in situ.

As formas de medir o estado de tensões *in situ* têm evoluído com o passar dos anos começando com os métodos de alívio de tensões dos anos 40's, o método do macaco plano desenvolvido nos 50's, métodos de alívio de tensões nos furos de sondagens, e as aplicações do fraturamento hidráulico na indústria do

petróleo da década dos 70. Hoje em dia inovadores métodos são disponíveis para medir tensões nas rochas a uma profundidade de 3 ou 4 km, dentro da crosta terrestre. Entre as principais técnicas de medida temos:

1. Métodos baseados no princípio de fraturamento.

- 1.1. Fraturamento Hidráulico.
- 1.2. Fraturamento Dilatométrico.
- 1.3. *Borehole Breakouts*.

2. Métodos baseados no princípio de alívio das tensões.

- 2.1. Métodos de Alívio na Superfície.
- 2.2. Técnica da subescavação (*undercoring*).
- 2.3. Métodos de Alívio do Furo da Sondagem.
 - 2.3.1. Técnica da sobrescavação (*overcoring*).
 - a. Deformação das Paredes.
 - Célula de CSIR (*Council for Scientific and Industrial Research*) ou Célula de Leeman.
 - Célula CSIRO (*Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization*).
 - b. Deformação do diâmetro.
 - Célula BDG (*Borehole Deformation Gauge*) do U. S. Bureau of Mines.
 - c. Deformação dos Fundos.
 - *Célula Doorstopper*.
- 2.4. Alívio de Grandes Volumes de Rocha.
 - 2.4.1. *Under Excavation*.

3. Método baseado na compensação de tensões.

- 3.1. Método do Macaco Plano.
- 3.2. Método do Macaco Cilíndrico (*Pressiômetro*).

4. Método baseado na recuperação de deformações.

- 4.1. *Anelastic Strain Recovery*.
- 4.2. Análise da Curva de Deformação Diferencial (DSCA).

5. Método baseado na memória das rochas.

- 5.1. Efeito Kaiser (*Acoustic Emission*).
- 5.2. Análise da Proporção da Deformação (DRA).

6. Método baseado nas respostas estruturais.

- 6.1. Técnicas Ultrasônicas.

6.2. Técnicas de Refração de Raios X.

7. Outros Métodos.

7.1. Análise dos Dados dos Deslizamentos das Falhas.

7.2. Estudos Sísmicos (focos de terremotos).

7.3. Inclusões em Rochas Tempo-dependente.

7.4. Medida das Tensões Residuais.

Ainda que a literatura contenha e estejam disponíveis muitos relatórios e artigos descrevendo muitos métodos de um tipo ou de outro, não há nenhum método completamente aprovado ou universalmente adotado. Isto é devido parcialmente às variedades de problemas que são encontrados.

4

A técnica do Pressiômetro e sua Aplicação na Determinação de Propriedades Mecânicas das Rochas

4.1.

Introdução

O primeiro modelo de pressiômetro foi desenvolvido por Kogler no ano de 1933 na Alemanha. Na década de 60, o engenheiro francês Louis Menard fez avanços significativos no aparelho original de Kogler. Voltando para França depois de terminar seus estudos na Universidade de Illinois Menard fundou o Centre d'études Louis Menard com a finalidade de difundir a aplicação deste equipamento, segundo Briaud apud Bello (2004) a primeira aplicação ocorreu na cidade de Chicago, EUA com o intuito de obter propriedades de deformabilidade do solo para fins de projeto de fundações.

O engenheiro francês Jezequel, desenvolveu o primeiro pressiômetro autoperfurante (PAF) no Laboratoire des Points et Chaussées (LPC), e desde então tem ocorrido avanços significativos em termos de equipamentos, metodologia de interpretação prática e aplicação do ensaio pressiométrico. Consequentemente, grupos especializados no desenvolvimento e comercialização de novos equipamentos foram constituídos ao redor do mundo, incluindo *Cambridge in situ*, *Fugro B.V.*, *Hogentogler*, *Rocktest*, *Texas A & M University* e a *Universidade de British Columbia* para citar alguns exemplos (Bello, 2004).

O ensaio pressiométrico basicamente consiste na expansão de uma membrana flexível dentro de um furo por efeito de um fluido injetado, até conseguir deformar o furo. A pressão do fluido e o volume de fluido equivalente ao volume de deslocamento do material são registrados. O módulo de deformabilidade é encontrado a partir de gráficos de pressão interna em função da quantidade de volume do fluido injetado na membrana ou em função das variações de diâmetro ocorrido pela membrana flexível (Galera, 2005).

Os primeiros modelos de pressiómetro desenvolvidos na década de 60 foram aplicados a solos de alta deformabilidade e que não requeriam grande precisão nas medidas de deformação (que se realizava volumetricamente), nem nas de pressão.

O pressiómetro usado em rocha geralmente apresenta uma membrana mais grossa e resistente para poder conseguir aplicar pressões maiores. Devido a estas características, elas são menos sensíveis e tem menos capacidade de expansão (Galera, 2005).

O dilatômetro surgiu na década de 70 como adaptação do pressiómetro de Menard, para aplicação em rochas. Rocha no LNEC (Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Portugal) foi um dos primeiros a desenvolver este tipo de equipamentos. A inovação deste equipamento era o sistema de medida da deformação, a qual não era volumétrica senão direta.

Diferentemente da maioria dos solos, um maciço rochoso é muito mais heterogêneo, descontínuo e bastante anisotrópico, resultando que em alguns casos (xistos, filitos, rochas estratificadas, etc.) é indispensável considerar a forte anisotropia existente, já que afeta fortemente sua deformabilidade.

Em um ensaio dilatométrico mede-se a deformação direta em seis direções (três diâmetros) a partir de sensores localizados ao redor do furo. A leitura se realiza em 6 canais correspondentes a 6 sensores que formam um ângulo de 60° um de outro, podendo-se posteriormente representar indistintamente os três raios medidos, ou a curva média de deformação (Galera, 2005).

Como resultado de um ensaio pode-se conhecer a anisotropia do terreno, aliás, permite medir módulos na fase de descarregamento. Um dos modelos mais usados é o chamado Dilatômetro de Alta Pressão (High Pressure Dilatometer – HPD), desenvolvido por Hughes & Ervin (1980).

Um outro método cujo princípio básico é também a injeção de fluido dentro de uma membrana expansível é o método do *Sleeve Fracturing*, originalmente desenvolvido para determinar tensões *in situ*, permite também a partir da estimativa do coeficiente de Poisson determinar o módulo de deformabilidade.

O método foi primeiro proposto por Stephansson (1983) e em linhas gerais segue o mesmo princípio do fraturamento hidráulico desenvolvido para a determinação de tensões *in situ*. Uma membrana é inserida dentro de um furo e depois pressurizada, como no caso do fraturamento hidráulico, uma fissura é

iniciada nas paredes do furo, uma vez que a pressão aplicada excede a resistência à tração da rocha gerando uma fratura em direção perpendicular à menor tensão horizontal *in situ* (Serata, 1986).

As tensões principais máximas e mínimas atuantes no plano perpendicular ao furo são determinadas pela pressão de fechamento e de abertura de uma fratura simples ou dupla nas paredes do furo, a obtenção das tensões é feita com base na solução de Kirsch. Até a fratura o ensaio é essencialmente um ensaio dilatométrico o qual pode ser usado para determinar o módulo de deformabilidade do maciço rochoso, assumindo um valor do coeficiente de Poisson (Amadei, 1997).

Galybin et al. (1997) propôs um novo método para determinar os módulos de deformabilidade do maciço rochoso além de permitir determinar também a magnitude das tensões *in situ* em grande escala. Este método é baseado no método do macaco cilíndrico proposto por Dean & Beatty (1968), que consiste na medição de deslocamentos radiais gerados na rocha pelo macaco cilíndrico dentro de um furo de sondagem. Galybin (1997) observou algumas imperfeições nesse método:

- ü Proximidade entre a posição dos pinos e o furo principal, restringindo a escala de medida das tensões e afetando o grau de exatidão.
- ü O sistema de medidas interfere com nas operações de perfuração e por isso para a execução têm que ser utilizados transdutores removíveis.

O esquema proposto por Galybin et al. (1997) elimina estas falhas e permite a reconstrução dos parâmetros de deformabilidade da rocha na escala de escavação.

O trabalho aqui apresentado baseia-se na técnica original desenvolvida por Dean & Beatty e modificada por Galybin, foram também feitas algumas modificações para melhorá-la sem afetar seu grau de precisão e exatidão.

4.2.

Hipótese e Fundamentos da Técnica

4.2.1.

Descrição Geral do Método

O método consiste em injetar pressão de óleo dentro de uma membrana flexível, a membrana é expandida lateralmente até alcançar as paredes de um furo previamente perfurado. Medem-se posteriormente os deslocamentos produzidos

pelo processo de furação e pela expansão da membrana. Estes deslocamentos são relacionados com a magnitude das tensões principais *in situ*, e com os parâmetros de deformabilidade existentes na zona onde se realiza o ensaio.

O método está distribuído em várias etapas. Na primeira etapa são inseridos na rocha pinos de referência distribuídos nos vértices de um hexágono, aonde são instalados sensores de deslocamento colocados radial e circunferencialmente ao furo central.

Na segunda etapa é feito um furo central de aproximadamente 45 cm de profundidade e 6 cm de diâmetro aonde será colocado o equipamento. Durante a execução da perfuração é monitorada a variação da distância entre pinos (deslocamento relativo entre os pontos) até o furo atingir uma profundidade entre 30 a 40 cm; nesse momento a perfuração é paralisada e são registrados os deslocamentos produzidos pelo processo de relaxação da rocha.

Na terceira etapa continua-se com a perfuração do furo principal até alcançar uma profundidade de 45 cm, aqui o testemunho é retirado e é colocado o pressiômetro dentro do furo. Em seguida começa o processo de pressurização, aonde é injetado pressão de óleo na membrana do pressiômetro até conseguir deslocamentos significativos na rocha. São feitos vários ciclos de pressurização em estágios de carregamento e descarregamento medindo-se a variação de distância entre pinos. Os deslocamentos produzidos são registrados mediante um sistema de aquisição de dados, posteriormente os dados adquiridos são processados em um computador e são calculados os módulos de deformabilidade e a magnitude das tensões *in situ*. Na figura 4.1, mostra-se um esquema do ensaio.

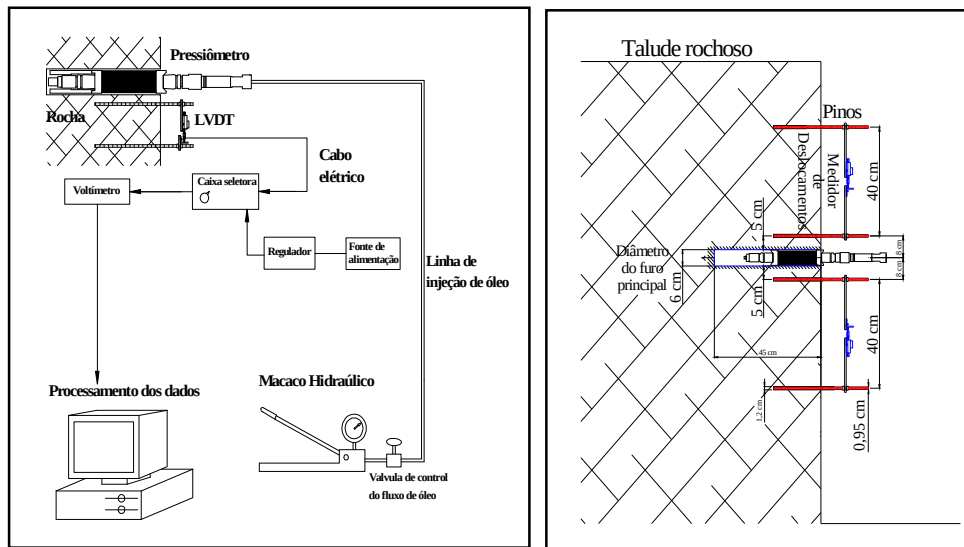


Figura 4.1 – Esquema do ensaio do pressiômetro

4.2.2.

Hipótese Adotada

Embora a análise das propriedades do maciço rochoso considere a complexidade do seu comportamento, o problema pode ser inicialmente simplificado considerando-o como um material contínuo, homogêneo, isotrópico e linearmente elástico.

Jaeger (1968) analisou o comportamento das tensões no interior de um furo em um maciço rochoso para medir o módulo de deformabilidade a partir da pressão de fluido uniformemente distribuído, que é injetado através de uma membrana impermeável a qual é inserida dentro de um furo. O diâmetro dos furos pode variar de poucos centímetros a vários metros como é o caso do ensaio de pressão de câmara. Os deslocamentos radiais u_R produzidos por uma pressão interna Q em um furo circular de raio R é dado pela equação 4.1.

$$u_R = -\frac{QR}{2G} \quad 4.1$$

Medidas da expansão diametral $2u_R$ e da pressão interna Q permitem determinar o módulo cisalhante G da rocha ao redor de um furo de sondagem ou de um túnel. Estes deslocamentos dependem do coeficiente de Poisson, portanto medidas em duas direções diferentes devem ser feitas para que o coeficiente de Poisson e o módulo cisalhante G sejam determinados.

A perfuração de um furo ou a escavação de um túnel é um processo de depressurização, o qual é definido como o inverso do processo de pressurização

descrito anteriormente. Assumindo-se que as dimensões do túnel ou do furo são conhecidas, a deformação resultante pode ser definida como a deformação causada pelo processo de remoção do campo das tensões na circunferência do furo. A deformação induzida na circunferência de um furo de raio R é definida pela equação 4.2.

$$ur = R(1+u)[s_x + s_y + (s_x - s_y)(3-4\nu)\cos q]/2E \quad 4.2$$

Essa equação é formulada para condições de deformação plana, onde s_x e s_y são as tensões normais ao eixo do furo e q é a direção entre o raio R e a direção de s_x . Se as deformações induzidas são medidas ao longo de três ou mais diâmetros em diferentes orientações e o módulo de Young é encontrado por um ensaio de pressurização a equação 4.2 pode ser usada para estimar o estado de tensões ao redor de um túnel o de um furo de sondagem.

As assunções feitas por Jaeger descritas anteriormente são as mesmas usadas no presente trabalho, mas como será visto nos próximos itens à formulação matemática empregada nos cálculos apresenta algumas variantes.

4.2.3.

Modelos Matemáticos Empregados

Matematicamente o método está baseado na solução de Kirsch para um furo circular em um plano elástico isotrópico baixo condições de deformação plana. As mudanças em deslocamento são devidas primeiramente à perfuração do furo de raio R e depois à pressurização do furo aplicando uma pressão Q são representados pela equação 4.3 usando números complexos.

$$u_r(r,q) + iu_q(r,q) = \frac{R^2}{2Gr} \left\{ \frac{s_1 + s_2}{2} - Q + \frac{s_1 - s_2}{2} \left[ke^{-2i(q-j)} + \left(1 - \frac{R^2}{r^2} \right) ke^{-2i(q-j)} \right] \right\} \quad 4.3$$

Onde r e q são as coordenadas polares com a origem situado no centro do furo, $u_r + iu_q$ é a expressão complexa para as componentes do vetor deslocamento em coordenadas polares, G é o módulo cisalhante, $k = 3-4\nu$, ν é o coeficiente de Poisson, s_1 e s_2 são as tensões principais, j é o ângulo entre a primeira direção principal e o eixo x do sistema de coordenadas de referência (x, y) .

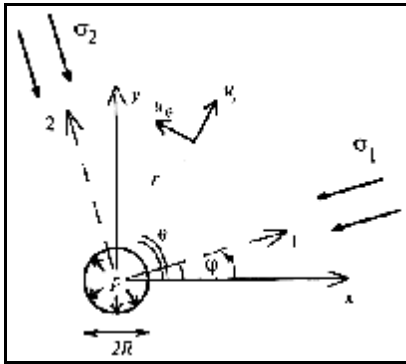


Figura 4.2 – Sistema de coordenadas relacionadas com o problema: (x, y) é o sistema de coordenadas relacionadas ao furo central; 1 e 2 são as direções das tensões principais (u_r, u_θ) são as componentes dos deslocamentos em coordenadas polares.

A equação 4.3 contém 5 parâmetros não conhecidos: os módulos de deformabilidade (G, k) e as características das tensões *in situ*, (s_1, s_2, j) . Para obter estes parâmetros, é necessário primeiramente considerar quatro medidas independentes de deslocamento em diferentes direções depois de perfurar o furo $(Q = 0)$, e pelo menos uma medição (uma componente de deslocamento) depois da pressurização.

Além disso, deve notar-se que a diferença dos deslocamentos antes e depois da pressurização é definida pela equação 4.4.

$$[u_r(r, q) + iu_\theta(r, q)]_{\text{antes}} - [u_r(r, q) + iu_\theta(r, q)]_{\text{depois}} = \frac{R^2 Q}{2Gr} \quad 4.4$$

Conhecendo a magnitude da pressão Q e a diferença entre as componentes de deslocamento radial é possível determinar diretamente o módulo cisalhante, enquanto a componente tangencial se mantém invariante, o qual poderia ser usado para controlar a qualidade das medidas.

4.3.

Esquema de Medidas Adotado

4.3.1.

Método Proposto por Dean & Beatty (1968)

Três características do campo de tensões *in situ* podem ser determinadas a partir de medidas feitas na superfície livre de escavação: $s_1, s_2, (s_3 = 0$ na superfície livre) e o ângulo j . No entanto precisam ser determinados os parâmetros de deformabilidade para o caso elástico isotrópico que são somente dois: o módulo de Young E e o coeficiente de Poisson ν . Estes parâmetros totalizam um valor de cinco parâmetros, que no caso bidimensional caracterizam

o estado tensão-deformação. Isto é para uma situação ideal 5 medidas independentes devem ser executadas e pelo menos uma delas deverá ter a unidade das tensões, a qual provê a reconstrução das magnitudes das tensões e do módulo de Young.

O método de macaco cilíndrico proposto por Dean & Beatty (1968) provê uma medida independente de tensões, a pressão fornecida pelo macaco. O esquema de execução do ensaio proposto por eles foi o seguinte:

1. Foram perfurados furos nos vértices de um octógono.
2. Pinos foram inseridos e deformametros colocados para medir as distâncias em quatro direções radiais.
3. Os medidores de deformação foram removidos e o furo central foi perfurado.
4. O macaco cilíndrico foi inserido dentro do furo central e os medidores de deformação foram reinstalados.
5. Foram medidas contrações entre os pinos radiais.
6. Mudanças entre as distâncias radiais foram monitoradas durante a pressurização do furo.
7. Os valores das tensões e os módulos cisalhantes foram obtidos mediante a análise de mínimos quadrados das medidas de deformação.

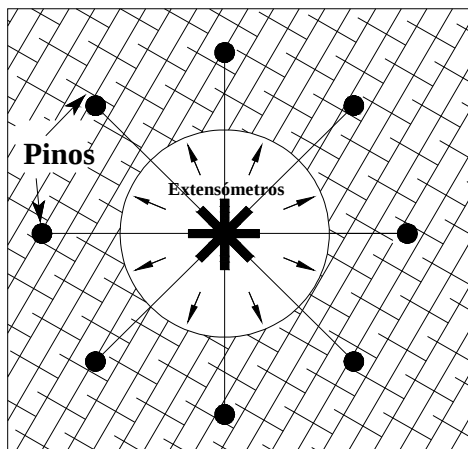


Figura 4.3 – Esquema de medidas proposto por Dean & Beatty para o método do macaco cilíndrico.

4.3.2.

Esquema de Medidas Proposto por Galybin & Dyskin (1999)

Galybin & Dyskin observaram alguns fatos no esquema de medidas adotado por Dean & Beatty (1968). Um fato é que foram monitorados somente deslocamentos radiais o que não é suficiente para recuperar a constante de Poisson (requerer-se-ia pelo menos uma medida na direção perpendicular); devido ao fato que os pinos de medida foram localizados perto ao contorno do furo central a escala de medida seria somente da ordem do diâmetro do furo.

Uma complicação relacionada com as equações 4.3 e 4.4 mostradas no item 4.2.3 é que as medidas das componentes radial e tangencial de deslocamento na superfície de escavação requereriam equipamentos especiais. Por isso Galybin propõe a medição dos deslocamentos (elongação e contração) ao longo de uma linha; as medições podem ser feitas utilizando transdutores ópticos, strain gauges de corda vibrante ou transdutores de deslocamento (LVDT's).

O número mínimo de medidas a ser tomadas vai depender das características da rocha. Para rochas isotrópicas são precisos pelo menos quatro extensômetros localizados em direções diferentes. Isto proporcionaria quatro medidas independentes da mudança de deslocamentos depois que o furo foi perfurado e outras quatro depois da pressurização. Dessa maneira, têm-se medidas de redundância para a determinação do módulo de cisalhamento. Para a determinação do módulo de cisalhamento a melhor orientação dos extensômetros seria em direção radial de acordo com a equação 4.4. Porém, como foi visto da equação 4.3, somente as medidas de deslocamento radial ($\theta = \text{cte.}$) não são suficientes para separar $\sigma_1 - \sigma_2$ e k de seu produto. Por isso, adicionalmente são necessárias outras medições além das radiais..

Com todo isto se conclui que deve evitar-se que o esquema de medidas não interfira com as operações de perfuração e pressurização. Para satisfazer estas condições, Galybin sugere o arranjo simétrico mostrado na figura 4.4. Neste arranjo N medidas são obtidas em direções radiais (linhas A_1-C_1 , A_2-C_2 ,..., A_N-C_N na figura 4.4) e N medidas na direção circunferencial (linhas B_1-B_2 , B_2-B_3 ,..., B_N-B_1 na figura 4.4). O número de medidas N deve ser escolhido de tal forma que satisfaça os requerimentos de redundância (quatro como mínimo) e proveja a precisão para determinar as tensões e os módulos.

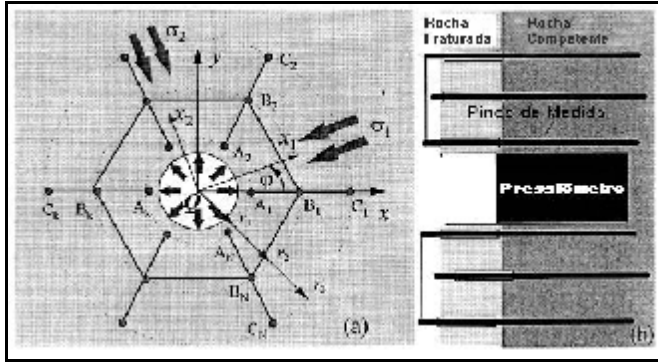


Figura 4.4 – Esquema de medidas proposto por Galybin et al

4.3.3.

Procedimento para a Reconstrução das tensões e o Módulo

4.3.3.1.

Variação da distância entre Pinos

Sejam $P_m(x_m, y_m)$ as coordenadas iniciais dos pinos inseridos dentro da rocha antes da perfuração do furo central e $I_{mn} = P_m - P_n$ seja o vetor que conecta dois pinos qualquer. O vetor deslocamento produzido depois da perfuração será $V(x, y) = \{u(x, y), v(x, y)\}$, por tanto pequenas variações de longitude d_{mn} dos vetores I_{mn} podem ser expressos pelo produto escalar apresentados na equação 4.5.

$$d_{mn} = \Delta V_{mn} I_{mn} \quad 4.5$$

Aqui:

$$I_{mn} = \{\cos \alpha_{mn}, \sin \alpha_{mn}\}, \quad \Delta V_{mn} = V(P_m) - V(P_n) \quad 4.6, 4.7$$

Onde α_{ij} é o ângulo entre o vetor I_{mn} e a direção positiva do eixo x.

Para o arranjo mostrado na figura 4.4 os deslocamentos relativos (alongamento ou encurtamento) entre pinos podem ser expressos pelo índice $k=1....N$. A expressão complexa para as coordenadas dos pinos é representada na equação 4.8.

$$A_k = r_1 \exp\left(\frac{2ipk}{N}\right) \quad B_k = r_2 \exp\left(\frac{2ipk}{N}\right) \quad C_k = r_3 \exp\left(\frac{2ipk}{N}\right) \quad 4.8$$

Para os transdutores circunferenciais, as equações 4.6 e 4.7 tomam a forma:

$$I_k = i \exp\left(ip \frac{2(k+1)}{N}\right) \quad \Delta V_k = V(B_{k+1}) - V(B_k) \quad 4.9, 4.10$$

Similarmente para os transdutores radiais:

$$I_{k+N} = \exp\left(ip \frac{2k}{N}\right) \quad \Delta V_{k+N} = V(C_k) - V(A_k) \quad 4.11, 4.12$$

Os alongamentos/encurtamentos entre os pinos podem agora ser expressos somente por uma equação contendo os vetores deslocamento $V_k = u(x_k, y_k) - iv(x_k, y_k)$. Assim:

$$d_k = \text{Re}(I_k \bar{V}_k), \quad k = 1, \dots, 2N \quad 4.13$$

Para rochas isotrópicas a dependência tensão - deslocamento é dada pela equação 4.3. Para simplificar o tratamento de dados são introduzidos novos parâmetros:

$$P = \frac{s_2 + s_1}{2}, \quad s = \frac{s_2 - s_1}{2} \cos 2j, \quad t = \frac{s_2 - s_1}{2} \sin 2j \quad 4.14$$

Então o vetor deslocamento em coordenadas cartesianas é definido na equação 4.15

$$u(x, y) + iv(x, y) = \frac{R^2}{2Gr} e^{iq} [P - Q - k e^{-2iq} (s + it) - (1 - R^2 r^{-2}) e^{2i} q (s - it)] \quad 4.15$$

4.3.3.2.

Reconstrução do Módulo Cisalhante

O módulo cisalhante G pode ser encontrado com base a equação 4.4. Se a pressão interna Q é aplicada no furo, a diferença nas leituras dos transdutores estariam em concordância com o seguinte campo de deslocamento:

$$u_r = \frac{Q}{2G} \frac{R^2}{r} \quad u_q = 0 \quad 4.16$$

Os deslocamentos radiais ocasionam encurtamentos nos transdutores radiais (vetor L_r) e alongamento nos transdutores circunferenciais (vetor L_c).

Assim o módulo cisalhante pode ser expresso separadamente para os dados radiais e circunferenciais pelas equações:

$$G_r = \frac{\Delta Q}{2} \frac{R^2}{r_3 - r_1} \frac{D}{\langle L_r \rangle} \quad G_c = -\frac{\Delta Q}{2} \frac{R^2}{r_2^2} \frac{d}{\langle L_c \rangle} \quad 4.17, 4.18$$

Aqui D e d são as distancias dos transdutores radiais e circunferenciais respectivamente, $\langle L_r \rangle$ e $\langle L_c \rangle$ são os valores médios de L_r e L_c respectivamente.

4.3.3.3.

Reconstrução das Tensões *in situ* e da Constante de Poisson

Assumindo que o módulo cisalhante já foi obtido e considerando o estágio de $Q = 0$, o problema contém quatro parâmetros não conhecidos P, s, t, k . O número de leituras disponíveis segundo o esquema sugerido por Galybin (1997) seria igual a $2N$. Se o número de leituras independentes é muito maior que quatro então tem-se disponível suficiente redundância de valores, e o problema de determinação simultânea do módulo e das tensões pode ser reduzido a um problema de minimização de quatro variáveis.

Sendo δ o vetor de leituras do campo, $W(P, s, t, k)$ é o vetor deslocamento dado pelo lado direito da equação 4.15, então o problema pode ser expresso pela equação 4.19.

$$F(P, s, t, k) = \|d - W(P, s, t, k)\| \rightarrow \min \quad 4.19$$

4.3.4.

Análise de Sensibilidade

Para a disposição dos LVDT's ao redor do furo inicialmente se considerou o esquema proposto por Galybin&Dyskin (1999) o qual consiste em distribuir os pinos nos vértices de um hexágono inscrito em um círculo. Os raios de distribuição são obtidos pela equação 4.20.

$$d = 2r_2 \sin\left(\frac{P}{N}\right), r_1 = r_2 - d/2, r_3 = r_2 + d/2 \quad 4.20$$

Onde:

d = tamanho admissível do transdutor de deslocamento,

N = número de medidas obtidas na direção radial.

r_1, r_2 e r_3 = raios que dependem da distribuição escolhida para os pinos.

Galybin (1997) recomenda que à escolha das distâncias de medida devem estar sujeitas a uma boa relação entre a necessidade da escala de medição e a sensibilidade dos transdutores. Por este motivo não foram utilizadas as formulações por ele recomendadas, optou-se por fazer uma análise de sensibilidade para a distribuição dos pinos. Desta forma permite-se ter uma boa relação entre a escala de medição, sensibilidade dos transdutores e faixa de deslocamentos.

A análise de sensibilidade foi feita com base à equação. 4.3 da solução de Kirsch. Os valores de σ_1 e σ_2 e das propriedades mecânicas das rochas foram tomados de (Hees, 1996), (Ver tabela 4.1).

Tabela 4.1 – Valores usados para a análise de sensibilidade; Hess 1996.

Q (MPa)	σ_1 (MPa)	σ_2 (MPa)	E (MPa)	u	G (MPa)
15	5,90	2,87	15200	0,2	6333,33

Para a determinação do r_1 , buscou-se que o ponto A estivesse o mais perto do furo central, considerando-se, porém que esta distância também não afeta-se a estabilidade do furo. De acordo com as respostas das análises de sensibilidade (figura 4.5) foi escolhida um valor de r_1 de 8 cm a partir da origem das coordenadas (centro do furo central).

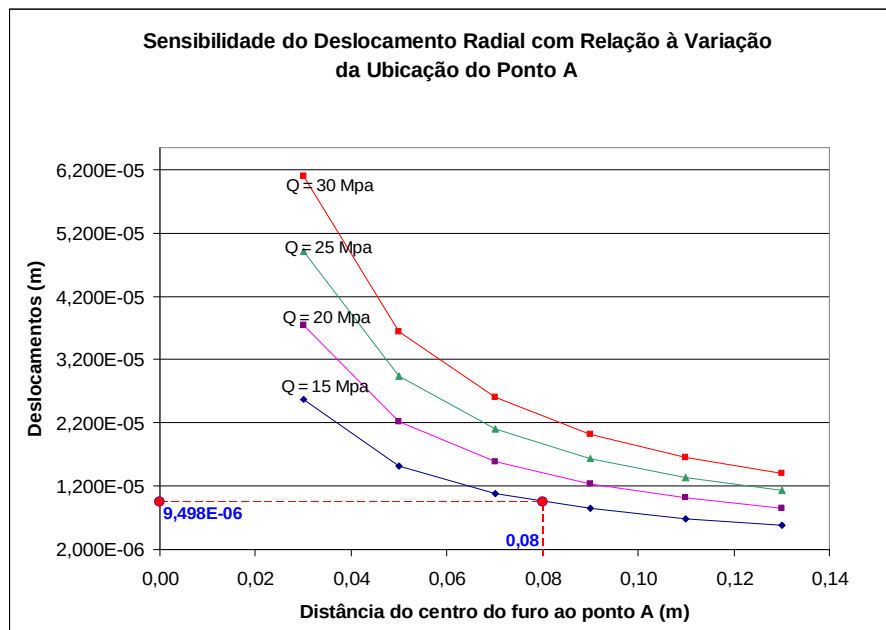


Figura 4.5 – Sensibilidade dos deslocamentos radiais com relação à variação da localização do ponto A.

Para a localização do ponto B a análise de sensibilidade mostrou que a uma distância de 40 cm a partir da localização do ponto B (48 cm da origem) seria a melhor possibilidade para realizar o ensaio, levando em consideração que o ponto C deve estar o mais longe possível para que este aja como ponto fixo do sistema.

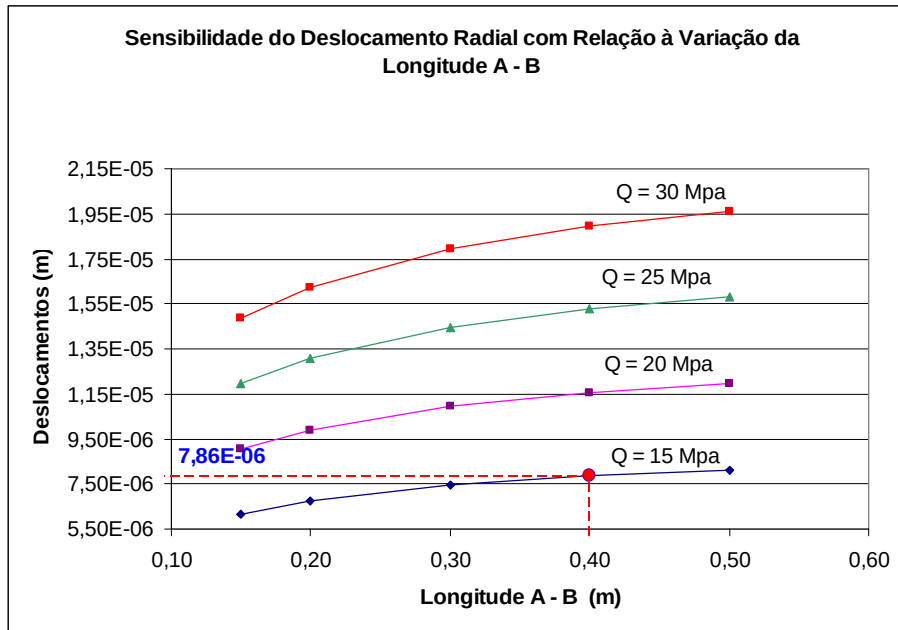


Figura 4.6 – Sensibilidade dos deslocamentos radiais com relação à variação da longitude A - B.

4.3.5.

Distribuição Final dos Pinos

Com base na análise de sensibilidade, foi projetada a distribuição dos pontos para a colocação dos pinos, conforme a figura 4.7.

A distância de 15 cm de raio para o ponto C (localização dos transdutores de deslocamentos para o registro dos deslocamentos circunferenciais), foi escolhida com base na mínima distância que podem ter os suportes dos transdutores. Considerando-se que estes devem estar localizados perto do furo central para conseguir uma maior sensibilidade dos transdutores.

Finalmente como mostra a figura 4.7, a rede de medição ficou com um furo central de raio $r = 0,03\text{m}$, $r_1 = 0,08\text{m}$, $r_2 = 0,48\text{m}$, $r_3 = 0,15\text{m}$.

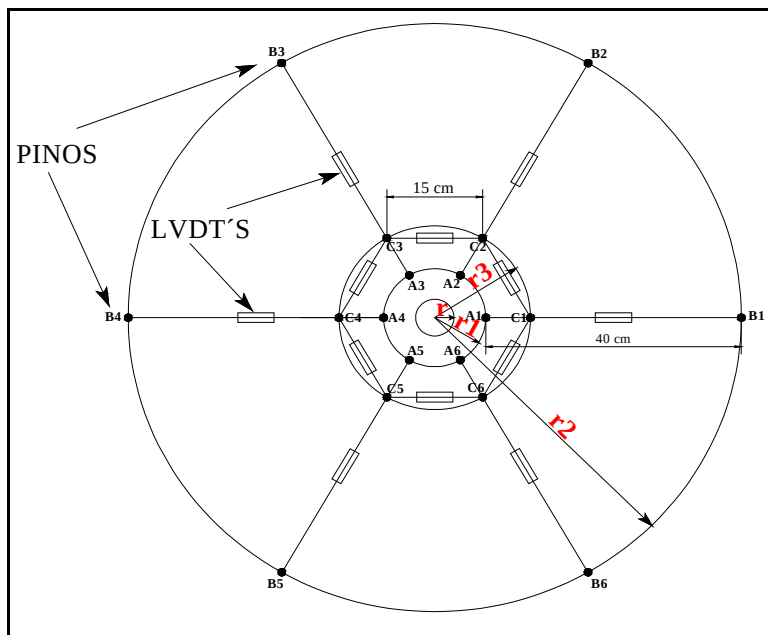


Figura 4.7 – Distâncias entre pinos e distribuição final dos LVDT's ao redor do furo.

Os deslocamentos esperados para estas condições foram da faixa de $7,86 \cdot 10^{-6}$ m para os deslocamentos radiais e de $5,03 \cdot 10^{-6}$ m para os deslocamentos circunferenciais.

5 Desenvolvimento do Pressiômetro

5.1.

Introdução

Este capítulo apresenta o equipamento que foi desenvolvido como motivo desta pesquisa, abordando os estudos realizados nas etapas de projeto, procedimento de montagem, sistema de instrumentação e demais informações técnicas pertinentes.

5.2.

Estudo do Projeto

5.2.1.

Fundamentos de Instrumentação

O sistema consta basicamente de três partes principais: O **macaco hidráulico** que é a unidade que injeta pressão de fluido a todo o sistema, o **pressiômetro** que vai aplicar deformação na rocha mediante uma membrana flexível, e o **sistema de aquisição de dados**, formado por medidores de deslocamentos (LVDT's), fonte de alimentação, regulador de voltagem e voltímetro.

A pressão de fluido é gerada através de um macaco hidráulico de braço simples que adicionalmente tem instalado uma válvula para controlar o fluxo de óleo do macaco para o pressiômetro, esta válvula permite fechar o sistema e manter a pressão constante.

Antes de começar a pressurização é necessário tirar o ar que se encontra dentro dos condutos do pressiômetro, para isto, o equipamento é preenchido de óleo e a membrana é pressionada manualmente para permitir a saída das bolas de ar. Posteriormente o preenchimento continua mecanicamente com a ajuda do macaco hidráulico.

A pressurização é realizada em vários estágios de carregamento e descarregamento e o processo de injeção de óleo é feito por etapas. O fluido que é

injetado passa ao pressiômetro pelo eixo principal onde é distribuído para a membrana expansível.

O sistema de aquisição de dados é distribuído da seguinte maneira: a fonte de alimentação primária é conectada a uma tomada comum de 110 volts; esta fonte age como um transformador mudando a voltagem recebida para 10 volts. A fonte de alimentação primária é ligada a um regulador para garantir que todo o sistema funcione com 10 volts. O regulador é conectado a uma caixa seletora de seis canais onde são conectados os LVDT's e o voltímetro (aparelho que registra as variações de voltagem). Quando o sistema fica montado e ligado, são tomadas leituras em vários intervalos de tempo até que os transdutores mostrem leituras de voltagem constantes (chamado tempo de estabilização das leituras).

Depois do tempo de estabilização o sistema esta pronto para realizar a perfuração do furo central (medição das tensões) ou a pressurização do furo (determinação dos parâmetros de deformabilidade).

5.2.2.

Avaliação de Protótipos para o Projeto

Um equipamento inicialmente desenvolvido e fabricado no Canadá serviu de base para o desenvolvimento do equipamento objeto desta pesquisa. Foram feitos vários testes para avaliar seu estado onde foram detectados pontos de vazamento nas conexões e envelhecimento da membrana expansível. Como resultado algumas peças foram adicionadas e outras tiveram que ser trocadas.

Para chegar à configuração final da membrana foram avaliados vários protótipos com diferentes características de composição, flexibilidade e capacidade de expansão.

Os protótipos (apresentados na figura 5.1) foram fabricados pela empresa Adromec. Os primeiros desenvolvidos não cumpriam as condições de flexibilidade e expansibilidade, características necessárias para este tipo de ensaio. Depois de testar varias qualidades de membrana no laboratório, um modelo (o qual demonstrou um bom comportamento as solicitações requeridas) foi testado em campo, mas depois de uma série de testes foi abandonado devido ao pequeno diâmetro externo (46 mm) em comparação com o diâmetro do furo (60 mm), motivo pelo qual o diâmetro externo foi mudado para 52 mm (conforme figura 5.1.c).

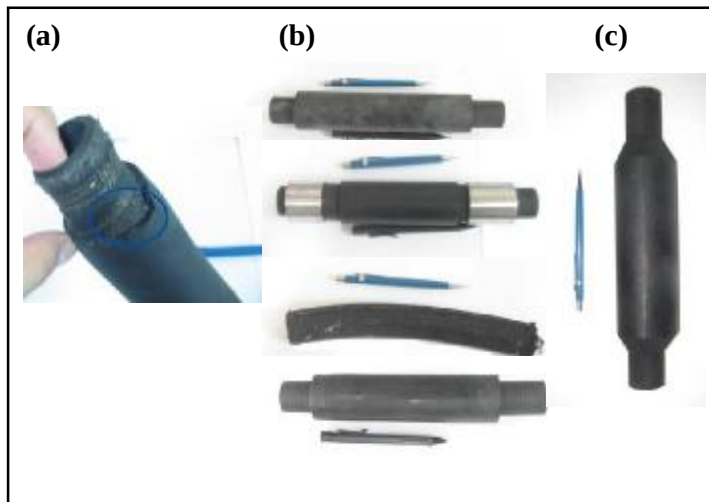


Figura 5.1 – (a)membrana original do equipamento, (b) Protótipos de membrana; (c) protótipo final.

O eixo central que distribui o óleo para dentro da membrana também foi modificado, no momento que a membrana encostava-se na parede, parte da pressão era suportada pelo eixo, produzindo alavanca contra as paredes do furo chegando a quebrar em alguns ensaios. O eixo foi alterado, aumentando a espessura das paredes e o diâmetro externo do mesmo. Com estas modificações a peça ficou mais resistente às pressões solicitadas.

Foram adicionados também anéis aos extremos da membrana para permitir uma melhor fixação dela nas paredes do furo. Os anéis impedem a movimentação em excesso do equipamento mantendo-o fixo e ajudando a aliviar em parte as tensões a que está submetido o aparelho no momento da pressurização uma vez que grande parte da pressão é suportada por estes. O projeto dos anéis também foi modificado progressivamente à medida que o equipamento foi testado; alguns protótipos quebraram durante os testes (figura 5.2.c) e outros foram melhorados até encontrar um protótipo que satisfaça as condições requeridas, o modelo final é mostrado na figura 5.2.d.

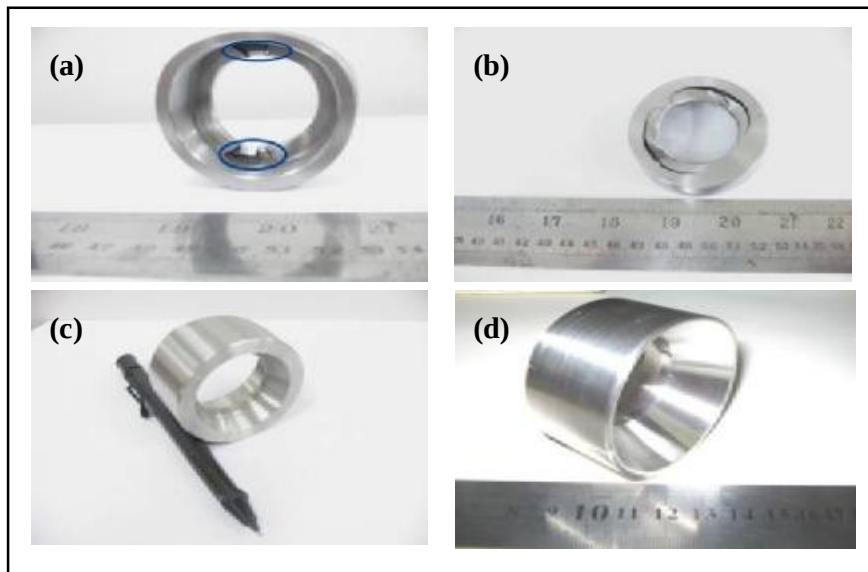


Figura 5.2 – (a), (b) Ruptura dos anéis; (c) segundo protótipo; (d) modelo final.

Um dos acessórios implementados no equipamento foi a camisa de aço parafusada em um dos anéis (tal como mostra a figura 5.3). A camisa foi colocada para ajudar a eliminar o efeito alavanca gerado no momento da pressurização e dissipar as pressões que são suportadas pelo eixo.



Figura 5.3 – Camisa protetora do pressiômetro.

5.3.

Características das Partes Constituintes

5.3.1.

Membrana Semiflexível

A membrana semiflexível foi feita de borracha nitrílica apresenta as seguintes dimensões: diâmetro interno de 25,4 mm, diâmetro externo de 52 mm. na parte central e 33 mm. nas laterais. Espessura de parede em condição não deformada de 10,3 mm , e nos extremos uma espessura de 3,8 mm.

A largura da membrana é de 25,95 cm, mas por efeito dos anéis, rosca de fixação, e anéis de fixação do equipamento dentro do furo a parte aproveitável fica reduzida somente a 15,5 cm. Estas dimensões são detalhadas na figura 5.4.

Possui uma dureza na escala shore de 85 a 90 shore A. Nas pontas está reforçada com lona de poliéster para dar-lhe maior resistência. Esta membrana é diferenciada da membrana original por não possuir rede interna de aço, por isso suas características de flexibilidade são menores.

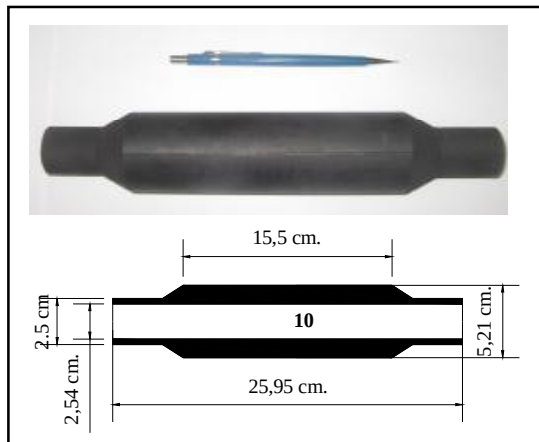


Figura 5.4 – Membrana expansível.

5.3.2.

Anel e Rosca de Fixação da Membrana

A fixação da membrana é feita em cada extremidade. O conjunto todo é constituído pelo anel de fixação (conforme figura 5.5) que é acoplada manualmente nos extremos da membrana e a rosca de fixação (conforme figura 5.6) com ponteira cônica, que pressiona a borracha contra o anel.

O anel de fixação é um corpo metálico com fio interno, cujo diâmetro interior é aproximadamente igual ao diâmetro exterior das extremidades da membrana, apresenta ademais outro fio interno no extremo oposto para permitir o encaixe com o anel de fixação.

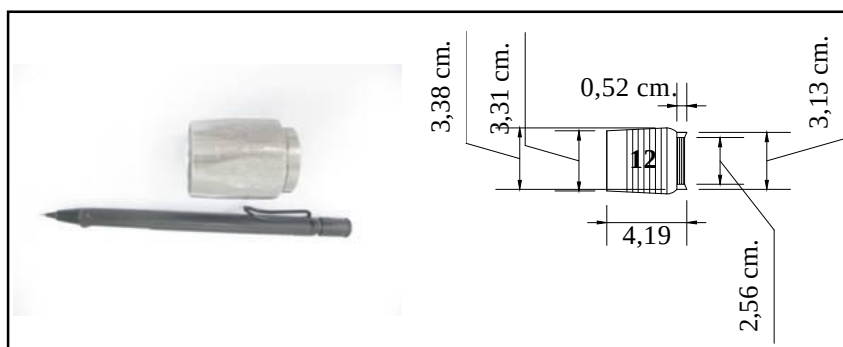


Figura 5.5 – Anel de fixação da membrana expansível.

A rosca de fixação apresenta dois extremos diferentes, o primeiro de ponta cônica vazada que permite pressionar a borracha contra o anel fixando-a, o outro extremo é de seção circular com fio externo que encaixa com o fio interno da rosca de fixação.

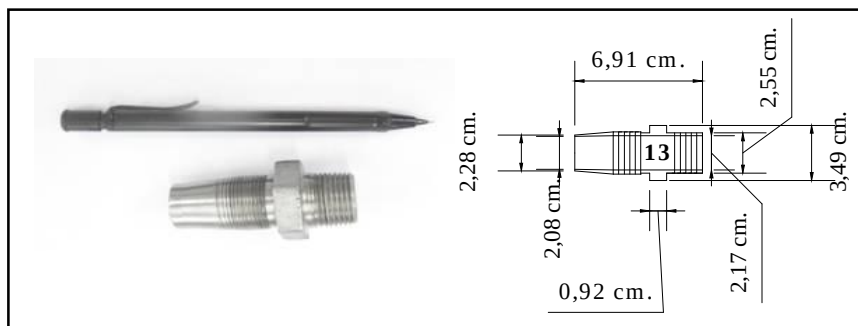


Figura 5.6 – Rosca de fixação da membrana expansível.

5.3.3.

Anéis de Fixação do Equipamento Dentro do Furo

Dois anéis de aço inoxidável foram adicionados ao modelo original do pressiômetro com a finalidade de fixar a membrana às paredes do furo (conforme figura 5.7). As duas faces dos anéis apresentam bordo cônico. Este bordo cônico permite a variação progressiva da espessura das paredes dos anéis, ficando com um diâmetro maior na parte central, permitindo uma melhor resistência às pressões que exercem as paredes do furo aos anéis quando é injetada pressão de fluido.

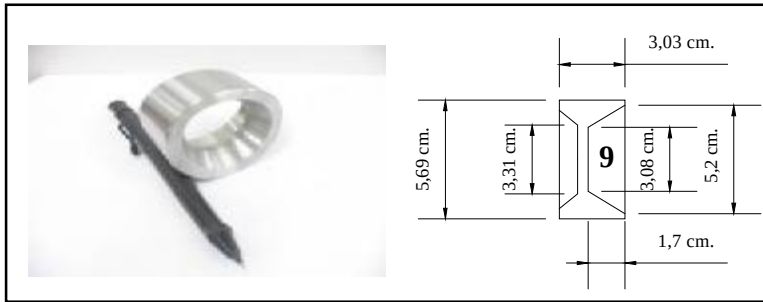


Figura 5.7 – Anel de fixação do equipamento dentro do furo.

5.3.4.

Eixo Central

O tubo ou eixo central é o conduto principal por onde o óleo passa através de todo o equipamento, até a membrana semiflexível. Tem um comprimento total de 49 cm e está feito de aço inoxidável. A peça (conforme figura 5.8) possui roscas nas suas extremidades para permitir a fixação com a rosca de vedação por um lado e pelo outro com os conectores. Na parte central apresenta dois furos por onde o óleo sai em direção à membrana.

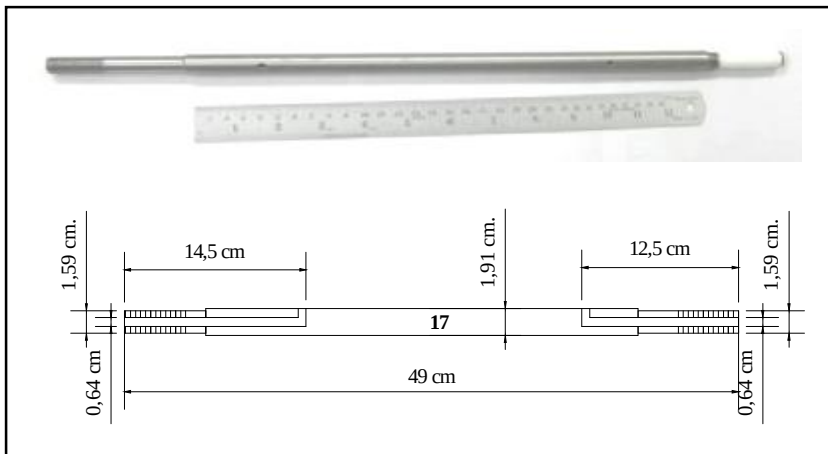


Figura 5.8 – Eixo central do pressiômetro.

5.3.5.

Conectores

Os conectores estão localizados nos dois extremos da membrana, os diâmetros internos e externos variam dependendo das peças adjacentes. O conector inferior (conforme figura 5.9.a) conecta o engate rápido com o eixo central e o conector superior (conforme figura 5.9.b) acopla a parte externa da rosca de fixação do tubo central com a rosca de fixação da membrana.

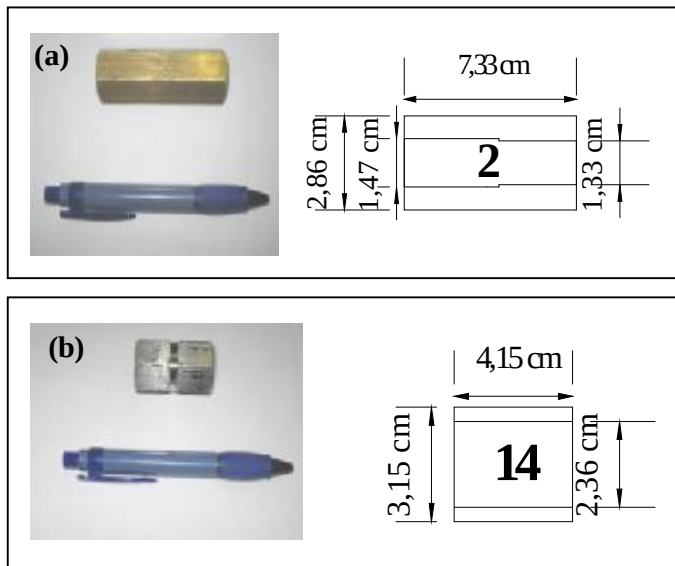


Figura 5.9 – Conector inferior (a) e superior (b).

5.3.6.

Camisa de Apoio

Feita de aço inoxidável é um acessório que vem acoplado a um dos anéis de fixação do equipamento (conforme figura 5.10), sua única função é servir de proteção e apoio ao eixo central contra efeitos de alavanca.

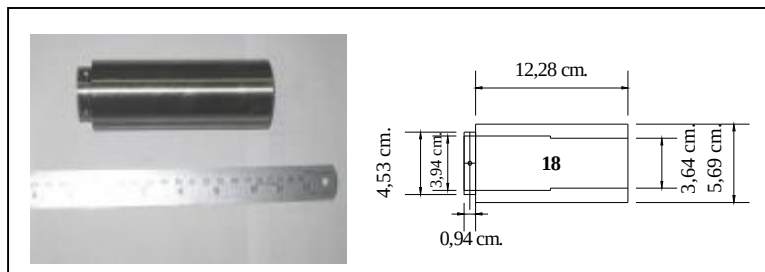


Figura 5.10 – Camisa de apoio do eixo.

5.3.7.

Características das Demais Partes Constituintes

Formam parte do equipamento também: conexão tipo engate rápido (conforme figura 5.11.a) que permite o óleo passar da mangueira do macaco até o corpo do pressômetro; os anéis de vedação (figuras 5.11 b e c) que impedem a saída de óleo pelas roscas e pelos anéis de fixação da membrana; a rosca de fixação do eixo central (figura 5.11.d) que fixa o tubo central ao conector superior, e por último a rosca de vedação (figura 5.11.e) que fecha o circuito de recorrido do óleo.

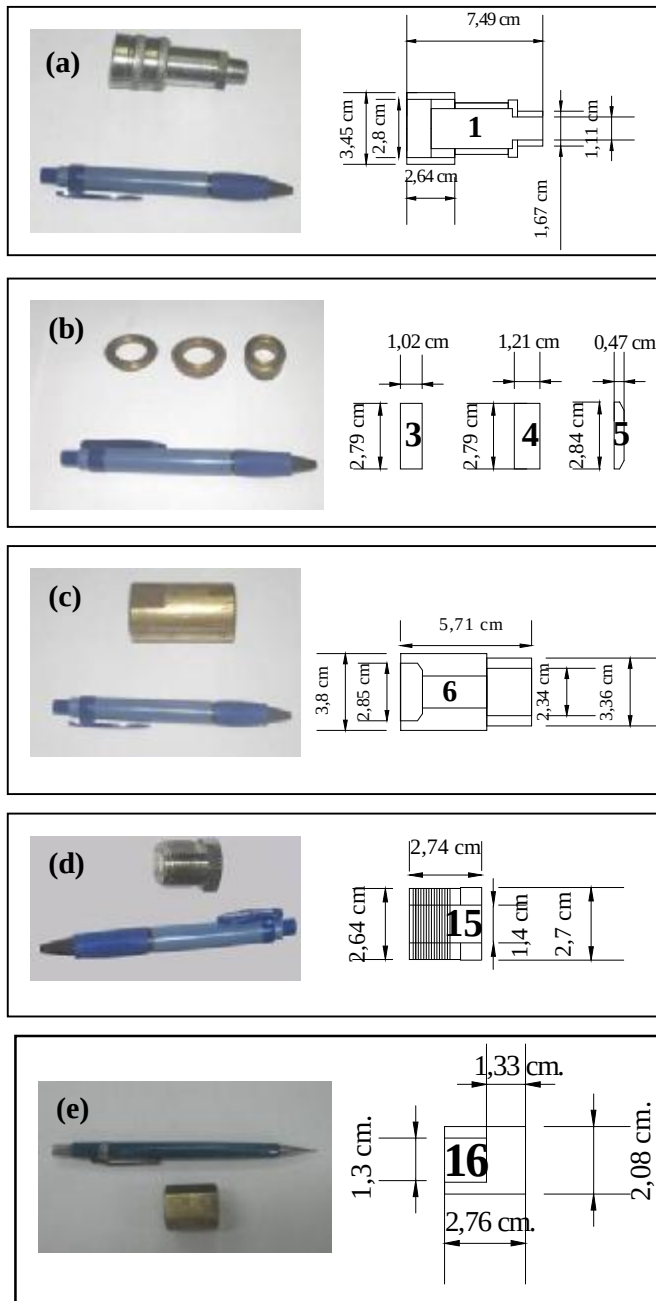


Figura 5.11 – (a) Conexão tipo engate rápido, (b) e (c) anéis de vedação, (d) rosca de fixação do eixo central, (e) rosca de vedação.

5.4.

Montagem do Pressiômetro

A montagem do pressiômetro foi realizada em laboratório, enquanto o restante dos equipamentos foi montado em campo conforme vai executando-se as diferentes etapas dos ensaios.

A primeira etapa na montagem foi a fixação da membrana: primeiro foram colocados os anéis de fixação (peça número 12 da figura 5.12) nos dois extremos, depois foi inserida a rosca de fixação (peça número 13 da figura 5.12) com a ponta cônica vazada para dentro da rosca, desta forma comprime-se a membrana contra a face interna da rosca, até que o fio externo dos anéis encaixe com o fio interno da mesma, depois foi preso todo o conjunto com uma chave ficando a membrana fixa nos dois extremos. Detalhes do sistema de fixação são mostrados na figura 5.12.

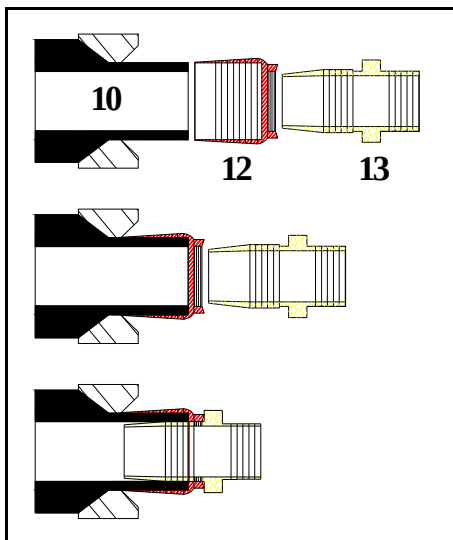


Figura 5.12 – Detalhe do sistema de fixação da membrana expansível.

Logo após foi colocado o conector superior a um dois anéis de fixação, do outro lado foram rosqueados o anel de vedação principal (peça número 6), seguidamente a rosca de fixação do tubo central foi rosqueada ao conector superior.

A segunda etapa é a colocação do eixo central, este foi conectado diretamente à rosca de fixação que já se encontra integrada à membrana como uma peça só, o eixo deve ser inserido, tomando cuidado em deixar suficiente fio para colocar a rosca de vedação.

No outro extremo e já com o eixo preso pela rosca de fixação, foram colocados os anéis de vedação. O conector inferior deve ser rosqueado ao eixo central segurando com uma chave a rosca de fixação (peça número 15) para impedir que no momento da colocação, o eixo fosse afrouxado. Por último o conector tipo engate rápido foi colocado.

A ultima peça a ser conectada foi a rosca de vedação, a montagem dever ser feita mantendo fixo o conector inferior, delo contrário no momento de prender a rosca de vedação se estará afrouxando o conector do eixo.

Por último é aparafusada a camisa de proteção a um dos anéis. O esquema do pressiômetro com as peças que o compõem é mostrado na seção longitudinal da figura 5.13.

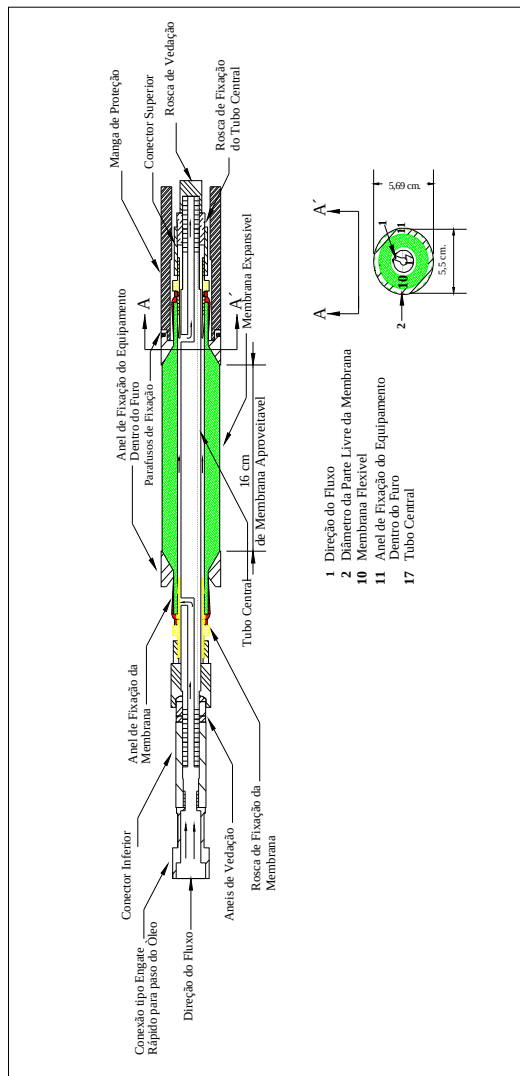


Figura 5.13 – Seção longitudinal do pressiômetro

5.5.

Fonte de Pressão

A fonte de pressão empregada é um macaco hidráulico de braço marca ENERPARC, modelo P-39 (conforme figura 5.14) com capacidade de armazenamento de $655,6 \text{ cm}^3$, fluxo de pressão de 262 cm^3 , pressão máxima de

68.948 MPa e mangueira hidráulica de 2.5 metros com conector de engate rápido para acoplar ao pressiômetro.

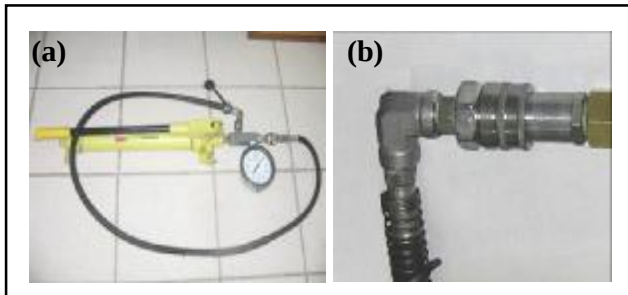


Figura 5.14 – (a) Maçado hidráulico de braço, (b) Detalhe da conexão macaco – pressiômetro.

5.6.

Sensor de Deslocamentos

Para a medição dos deslocamentos optou-se pelo uso de transdutores de tipo LVDT que são sensores para medição de deslocamentos lineares.

O funcionamento deste sensor é baseado em três bobinas e um núcleo cilíndrico de material ferromagnético de alta permeabilidade. Este dá como saída um sinal linear, proporcional ao deslocamento do núcleo, que está fixado ou em contato com o que se deseja medir.

A principal vantagem do LVDT sobre outros tipos de sensores de deslocamento é o seu elevado grau de robustez. Este fato é devido à sua própria concepção, pois não existe contacto físico entre o elemento móvel e as partes restantes do sensor. O núcleo apresenta baixa inércia não apresentando desgaste nem folgas (tempo médio entre falhas da ordem dos 300 anos).

Tendo em conta as grandezas dos deslocamentos decidiu-se pelo modelo PY2 fabricado pela Gefran (ver figura 5.15). Entre suas características principais estão: curso eletrônico útil (CEU) de 10mm, suporte duplo para a haste de controle e mola de retorno, linearidade independente de até $\pm 0,1\%$, velocidade de deslocamento de até 10 m/s, temperatura de operação: -30 a $+100^{\circ}\text{C}$, Expectativa de vida: $> 100 \times 10^6$ operações (dentro do CEU).

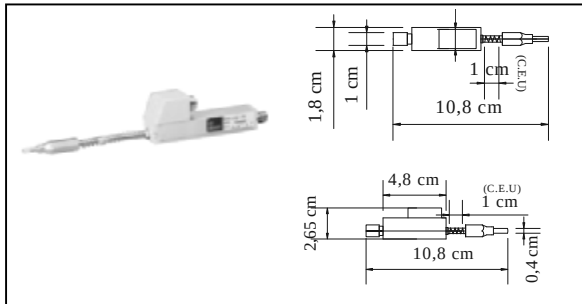


Figura 5.15 – Sensores de deslocamento (LVDT) modelo PY2.

5.7.

Sistema de Aquisição de Dados

5.7.1.

Fonte de Alimentação e Regulador de Voltagem.

A alimentação primária é obtida a partir de uma fonte de alimentação Tektronik modelo PSY281(figura 5.16.a) que funciona com 110 Volts com voltagem de saída na faixa de 0 a 30 Volts e de 0 a 3.0 amperes. A saída desta fonte é estabilizada por um regulador (figura 5.16.b) que fornece uma saída de 10 volts estabilizada em relação à variação de carga e temperatura.

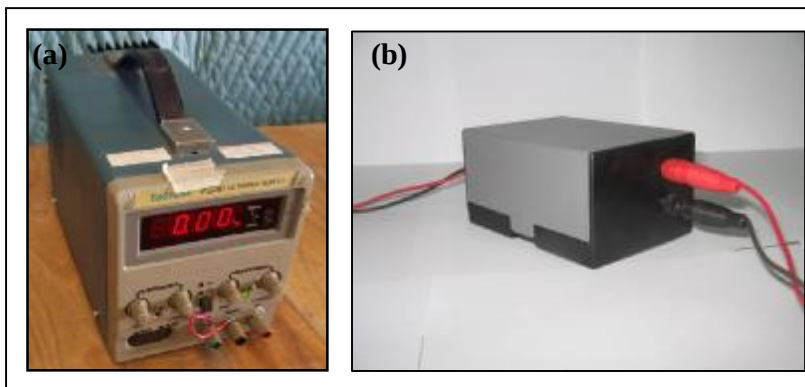


Figura 5.16 –(a) Fonte de alimentação primária, (b) regulador de voltagem.

5.7.2.

Voltímetro

O volímetro usado para registrar as variações de voltagem é um multímetro digital marca Analogic DP100 (conforme figura 5.17) de 5 e meio dígitos com resolução de até 10^{-5} volts (10mV).



Figura 5.17 – Multímetro digital para registro das variações de voltagem.

5.7.3.

Caixa Seletora

A seleção do LVDT a ser lido foi feita através de uma caixa seletora (Ver figura 5.18) de seis canais, que mantinha permanentemente alimentados todos os LVDT's a ela conectados.



Figura 5.18 – Caixa seletora de 6 canais.

5.8.

Calibração do Equipamento

5.8.1.

Calculo de Perda de Pressões por Efeito da Rigidez da Membrana

A rigidez é a capacidade de um objeto sólido ou elemento estrutural de suportar tensões sem adquirir grandes deformações ou deslocamentos.

A rigidez da membrana é a pressão necessária para deformá-la ao ar, sua avaliação é necessária para saber quanto da pressão aplicada é requerida no processo de expansão livre da membrana.

5.8.1.1.

Pressão Transmitida ao Cilindro de Aço

Para estimar á perdas de pressão por efeito da rigidez da membrana foram feitos testes de pressurização em tubos de aço. Para o calculo da perda de pressão

foi utilizada a teoria de tensões e deslocamentos em um cilindro de parede espessa em deformação plana (ver figura 5.19), (Figueiredo, 2007).

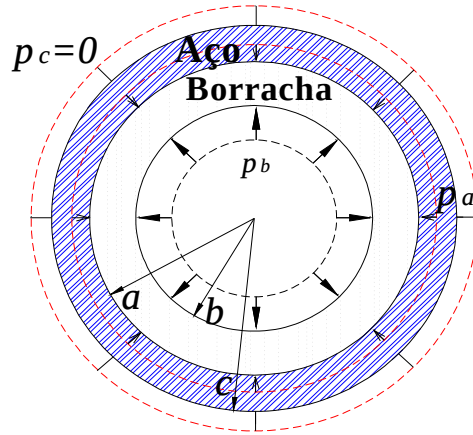


Figura 5.19 – Interação borracha-aço.

Sejam:

a = raio interno do cilindro e aço;

b = raio interno do cilindro de borracha;

c = raio externo do cilindro de aço;

p_a = pressão transmitida à parede interna do cilindro de aço;

p_b = pressão interna aplicada no cilindro de borracha;

p_c = pressão externa;

E_a e E_b = módulos de elasticidade do aço e da borracha, respectivamente;

G_a e G_b = módulos de cisalhamento do aço e da borracha, respectivamente;

l_a e l_b = parâmetros de Lamé do aço e da borracha, respectivamente;

n_a e n_b = coeficientes de Poisson do aço e da borracha, respectivamente.

As expressões gerais para as tensões radiais (s_r) e circunferências (s_q) em um cilindro de parede espessa com raio interno b e externo a , com pressões interna e externa, respectivamente, p_b e p_a , são (Jaeger & Cook, 1979):

$$s_r(r) = \frac{p_a a^2 - p_b b^2}{(a^2 - b^2)} \mp \frac{(p_a - p_b) a^2 b^2}{r^2 (a^2 - b^2)} \quad 5.1$$

Onde r é a coordenada radial.

Já os deslocamentos radiais (u) são dados por (Jaeger & Cook, 1979):

$$u(r) = \frac{(p_a a^2 - p_b b^2) r}{2(l + G)(a^2 - b^2)} + \frac{(p_a - p_b) a^2 b^2}{2G(a^2 - b^2) r} \quad 5.2$$

No caso de um problema assimétrico as deformações radiais (e_r) e circunferências (e_q) são dadas por (Jaeger & Cook, 1979):

$$e_r(r) = \frac{du}{dr} \text{ e } e_q(r) = \frac{u}{r} \quad 5.3$$

Por compatibilidade de deformações das circunferências em $r = a$ (interface dos cilindros de borracha e aço) devemos ter:

$$u(r=a)|_{aço} \equiv u(r=a)|_{borracha}.$$

$$\begin{aligned} \text{Tem-se: } u(r=a)|_{borracha} &= \frac{(p_a a^2 - p_b b^2)r}{2(l_b + G_b)(a^2 - b^2)} + \frac{(p_a - p_b)a^2 b^2}{2G_b(a^2 - b^2)r} = \\ &= \frac{(p_c c^2 - p_a a^2)r}{2(l_a + G_a)(c^2 - a^2)} + \frac{(p_c - p_a)c^2 a^2}{2G_a(c^2 - a^2)r} = u(r=a)|_{aço} \end{aligned} \quad 5.4$$

Desenvolvendo a igualdade acima para explicitar p_a no membro direito da igualdade, tem-se a desejada expressão para a pressão transmitida à face interna do cilindro de aço, em função da pressão interna no cilindro de borracha, p_b , dos parâmetros geométricos dos cilindros e constitutivos do aço e da borracha conforma a equação 5.5.

$$p_a = \frac{\frac{p_b b^2}{(a^2 - b^2)} \left\{ \frac{1}{l_b + G_b} + \frac{1}{G_b} \right\}}{\frac{1}{(a^2 - b^2)} \left[\frac{a^2}{l_b + G_b} + \frac{b^2}{G_b} \right] + \frac{1}{(c^2 - a^2)} \left[\frac{a^2}{l_a + G_a} + \frac{c^2}{G_a} \right]} \quad 5.5$$

Um caso particular da expressão acima é considerar o coeficiente de Poisson da borracha igual a meio ($n_b = 0.5$). Com isso tem-se $l_b \approx \infty$ e $G_b = E_b/3$. Assim, teremos:

$$p_a = \frac{\frac{p_b b^2}{(a^2 - b^2)} \left\{ \frac{3}{E_b} \right\}}{\frac{1}{(a^2 - b^2)} \left[\frac{3b^2}{E_b} \right] + \frac{1}{(c^2 - a^2)} \left[\frac{a^2}{l_a + G_a} + \frac{c^2}{G_a} \right]} \quad 5.6$$

Particularizando para o caso em que o coeficiente de Poisson do aço $n_a = 0.25$ (daí $l_a = G_a$ e $G_a = 2E_a/5$) a equação 5.6 é simplificada como:

$$p_a = \frac{\frac{3p_b b^2}{(a^2 - b^2)}}{\frac{3b^2}{(a^2 - b^2)} + \frac{a^2 + 2c^2}{(c^2 - a^2)} \left[\frac{5E_b}{4E_a} \right]} \quad 5.7$$

As dimensões do tubo de aço, da membrana e os parâmetros mecânicos de ambos são especificados na tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Valores usados para o cálculo da pressão transmitida ao aço.

a (m)	c (m)	b (m)	p_b (MPa)	Ea (MPa)	Eb (MPa)	u_b	u_a
0.0295	0.0317	0.0127	15	210000	525	0.49999	0.25

$$l_a = \frac{Ea \cdot ua}{(1 + ua) \cdot (1 - 2 \cdot ua)}; \quad l_a = 8.4 \times 10^4 \quad 5.8$$

$$l_b = \frac{Eb \cdot ub}{(1 + ub) \cdot (1 - 2 \cdot ub)}; \quad l_b = 7.88 \times 10^{17} \quad 5.9$$

$$Ga = \frac{Ea}{2 \cdot (1 + ua)}; \quad Ga = 8.4 \times 10^4 \quad 5.10$$

$$Gb = \frac{Eb}{2 \cdot (1 + ub)}; \quad Gb = 175 \quad 5.11$$

Aplicando a formulação *de parede espessa* caso deformação plana (Eq. 5.5) o valor da pressão transmitida ao cilindro de aço fica: $P_a = 13.662$ MPa, o que quer dizer que aproximadamente 91,1% da pressão de P_b é transmitida ao cilindro de Aço. Para os casos especiais onde $u_b = 0.5$ e $u_a = 0,25$ aplicando as equações 5.6 e 5.7 os valores de P_a foram os mesmos.

5.8.1.2.

Pressão Transmitida à Rocha

Para estimar a pressão transmitida à rocha pelo pressômetro (conforme figura 5.20) tem que se aplicar a seguinte formula:

$$p_b = \frac{\frac{3 \cdot p_b \cdot b^2}{(a^2 - b^2)}}{\left[\frac{3 \cdot b^2}{(a^2 - b^2) \cdot Eb} \right] + \frac{1}{Gr}} \quad 5.12$$

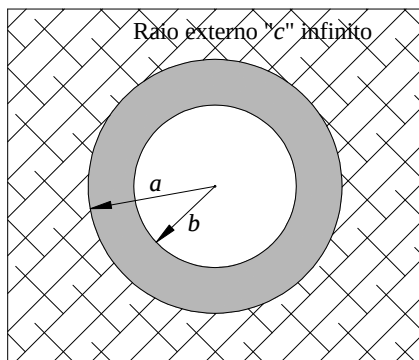


Figura 5.20 – Interação borracha- rocha.

Onde:

a = raio interno do furo na rocha (m);

b = raio interno do cilindro de borracha (m);

p_r = pressão transmitida à rocha pelo pressiômetro (MPa);

p_b = pressão interna aplicada no cilindro de borracha (MPa);

G_r = módulo cisalhante da rocha (MPa);

E_r = módulo de elasticidade da rocha (MPa);

E_b = módulo de elasticidade da borracha (MPa);

ν_r = coeficiente de Poisson da rocha;

c_r = raio externo da rocha considerada infinita.

Tabela 5.2 – Valores usados para o calculo da pressão transmitida à rocha pelo pressiômetro.

a (m)	c_r (m)	b (m)	p_b (MPa)	E_r (MPa)	E_b (MPa)	ν_r
0.03	Infinito	0.0127	15	15200	525	0.20

Finalmente o valor da pressão p_r calculado foi de 14. 87 MPa o que dá que 99,1% da pressão gerada pela injeção de fluido é transmitida à rocha. Conclui-se que não é necessário considerar a calibração da membrana, pois sua rigidez quase não afeta a pressão interna produzida pelo pressiômetro.

5.8.2.

Calibração dos Transdutores

5.8.2.1.

Metodologia Empregada

A calibração foi feita usando um equipamento eletrônico para medir distâncias com sensibilidade de 0,001 micras. Para o registro da voltagem foi utilizado um voltímetro conectado a uma fonte de alimentação e a um regulador de energia. As leituras foram de ida e volta, tomadas desde a metade do CET (Curso Eletrônico Útil) a cada 0,005 mm.

5.8.2.2.

Resultado das Calibrações

Na figura 5.21 se apresenta as curvas com os resultados das calibrações para as medidas de ida e volta do CET. O gráfico apresenta valores feitos a partir das variações de voltagem em função da distância.

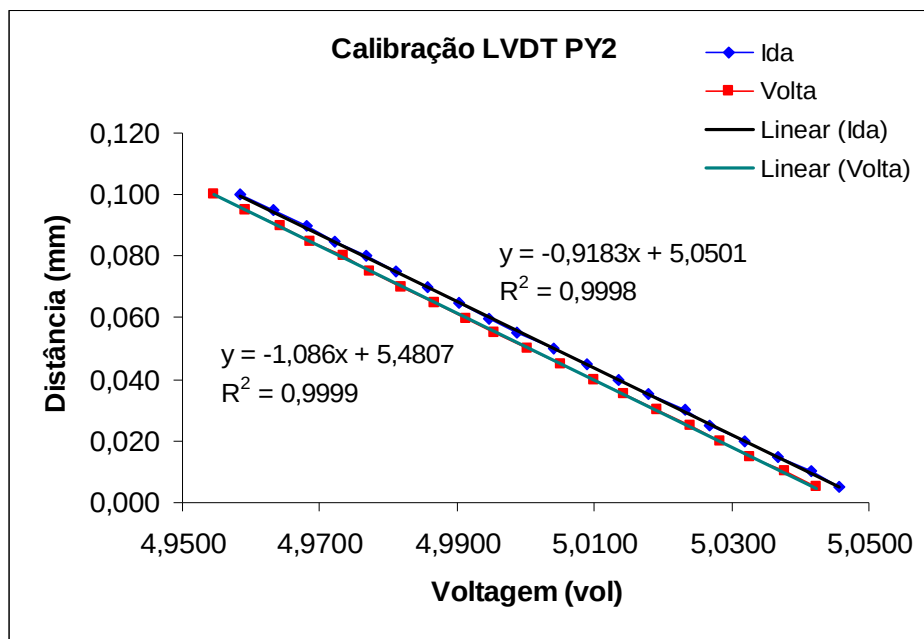


Figura 5.21 – Curva de calibração do LVDT PY2.

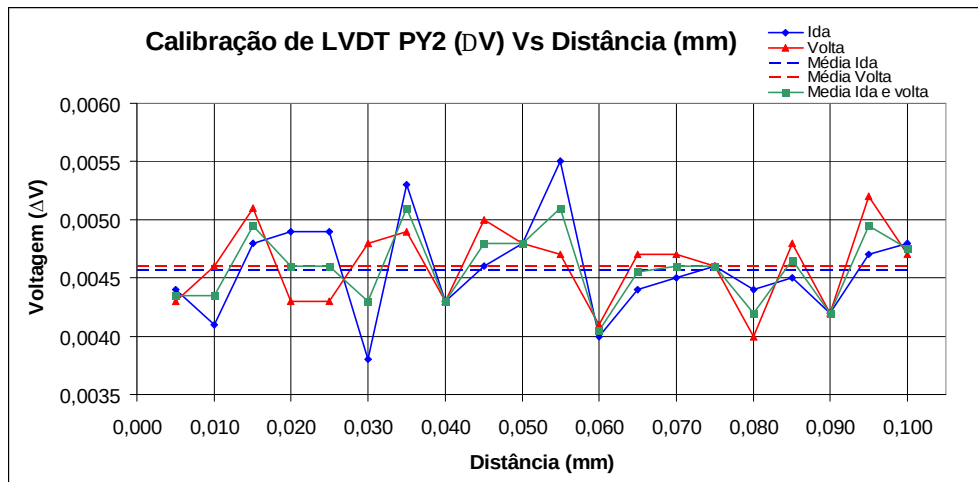


Figura 5.22 – Variação da voltagem em função da longitude para o LVDT PY2.

A elaboração da curva de calibração foi feita com base nas variações de voltagem e das distâncias. Tomou-se uma média das variações de voltagem de ida (mDV_i) e de volta (mDV_f), fazendo-se pela sua vez uma média aritmética entre os dois valores, equação 5.13:

$$\Delta V_f = \frac{(m\Delta V_i + m\Delta V_f)}{2} \quad 5.13$$

A equação da reta é dada pela equação 5.14.

$$\Delta L = a\Delta V_f \quad 5.14$$

Onde a é a inclinação da reta; ΔL são as variações de distâncias as quais são constantes para qualquer valor de ΔV_f (o intervalo de medidas se repetiu em todas as leituras, no valor de 0,005); ΔV_f seria dada pela equação 5.13 cujo valor é igual a $4,59 \cdot 10^{-3}$.

Assim a equação de calibração para PY2 ficaria dada pela equação 5.15

$$\Delta L = 1,089\Delta V \quad 5.15$$

Como na calibração só foi tomada uma parte do CET e a equação deve ser aplicável para o comprimento total do CET, então não foi tomada a parcela b da equação geral da reta ($y = ax + b$).

6

Metodologia de Instalação, Montagem e execução do Ensaio

6.1.

Equipamentos e Instrumentação para a Instalação dos Sensores de Deslocamento

6.1.1.

Equipamentos de Perfuração e Brocas

Para a perfuração do furo central foi utilizada uma esmerilhadeira tipo Makita modelo GA9020 de 2,200 Watts de potência, com velocidade de 6600 rpm. Na esmerilhadeira foi adaptada uma válvula de controle (ver figura 6.1.b) para permitir a circulação de água dentro do sistema de perfuração e possibilitar a refrigeração das brocas no momento da execução do furo.

Foram utilizadas duas brocas diamantadas, uma de 60 mm de diâmetro e 50 mm de comprimento usada para direcionar e perfurar os primeiros centímetros do furo; e, uma broca maior de 60 mm de diâmetro por 450 mm de comprimento, com a qual se perfurou o comprimento completo do furo. Todos estes equipamentos foram adquiridos na empresa J. Morais Máquinas, e são mostrados na figura 6.1.

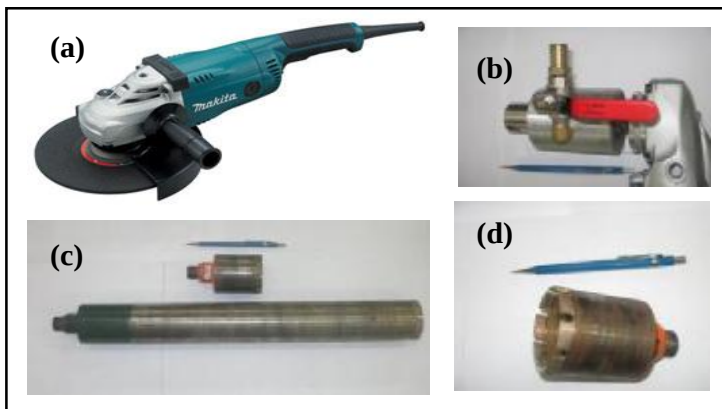


Figura 6.1 – (a) Esmerilhadeira modelo GA9020, (b) válvula para o controle da água do sistema de perfuração, (c) brocas diamantadas de 50 e 450 mm. De comprimento, (d) detalhe dos diamantes na coroa da broca.

6.1.2.

Martelete e Brocas de Encaixe

Os furos para a inserção dos pinos de aço na rocha foram feitos com um martelete tipo Makita modelo 2450T de 110Volts, com potencia de 780 Watts, 1.100 rpm e impacto de 4.500 ipm. Foram usadas duas brocas de encaixe SDS Plus, a maior de 12 mm de diâmetro e 40 mm de comprimento e uma menor de 12 mm de diâmetro por 10 mm de comprimento.



Figura 6.2 – Martelete e broca de encaixe.

6.1.3.

Fixador Químico dos Pinos

As fixações dos pinos de aço na rocha foram feitas com chumbadores químicos marca Ancora e aplicados com uma pistola de injeção. Nos chumbadores foi adicionado um catalisador para acelerar o processo de secagem, o qual é de aproximadamente 10 minutos, sendo sua secagem ótima de 12 horas.

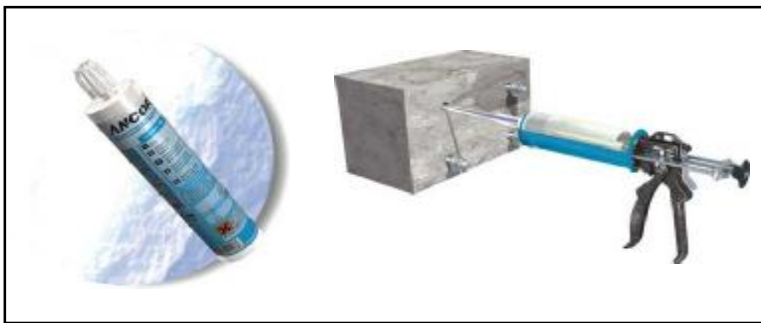


Figura 6.3 – Cimentante químico e pistola de injeção.

6.1.4.

Pinos de Aço e Chapas de Suporte

Os pinos utilizados para a montagem dos LVDT's, são barras rosqueadas de aço inoxidável de 3/8" (0.95 cm) de diâmetro por 16 fios. Os LVDT's são montados sobre chapas de alumínio as quais são presas aos pinos por porcas de latão, as dimensões das chapas dependem da posição dos transdutores (radiais ou circunferenciais). A figura 6.4 mostra detalhes do sistema de suporte empregado.



Figura 6.4 – Sistema de suporte para os sensores de deslocamento (LVDTs).

6.1.5.

Gabaritos.

Para a instalação dos pinos foram utilizados dois gabaritos, o primeiro feito de madeira, no qual foi desenhada a malha usada para a distribuição dos pinos e serviu para marcar o ponto exato onde os pinos deviam ser colocados, na figura 6.5 mostra-se o gabarito mencionado e a forma em que foi empregado. O segundo gabarito é feito de aço e foi utilizado para a fixação dos pinos para garantir o paralelismo que necessariamente deve existir entre cada par de pinos que suporta um LVDT. Os gabaritos de aço e sua forma de emprego são mostrados na figura 6.6.



Figura 6.5 – Gabarito de madeira usado para a localização dos pinos e direção dos furos.



Figura 6.6 – Sistema de suporte para os sensores de deslocamento (LVDT's).

6.2.

Procedimentos para a Instalação dos Equipamentos e Execução do Ensaio

A metodologia de instalação e montagem desenvolvida nesta pesquisa foi aperfeiçoada e foram feitas novas implementações conforme eram efetuadas experiências em campo.

O primeiro passo para a execução do ensaio foi a perfuração na rocha dos furos aonde vão ser inserido os pinos. Para a localização dos pontos a serem perfurados foi colocado um gabarito de madeira, o qual serve também como guia nos primeiros tramos da perfuração. Com o martetele e a broca de encaixe de 10 cm de comprimento foram feitos furos nos lugares onde posteriormente foram inseridos os pinos, também foi marcado com a broca adiamantada o lugar onde posteriormente ia ser executado o furo central.

Depois do marcados dos pontos, o gabarito foi retirado, e a perfuração foi continuada com as brocas de encaixe de 40 cm, até alcançar uma profundidade de 15 cm.

Logo após a perfuração procede-se à injeção do chumbador químico e a colocação dos pinos. Os pinos foram colocados conjuntamente com os gabaritos de aço para garantir o paralelismo entre eles. Depois do tempo de secagem (aprox. 10 m), procedeu-se à montagem dos suportes e dos LVDT's.

Na figura 6.7 se mostra um esquema com o sistema de fixação dos sensores.

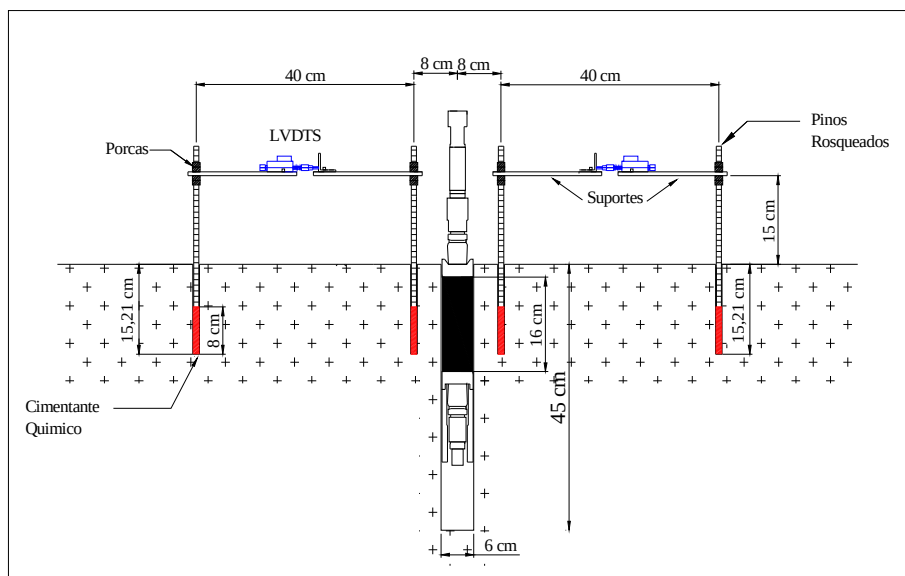


Figura 6.7 – Esquema mostrando o sistema de fixação dos sensores.

Na perfuração do furo central utilizou-se água como refrigerante das brocas adiamantadas, por esta razão os transdutores foram isolados com filme de PVC transparente para evitar que a água molhasse os transdutores.

As chapas que serviram de suporte para os LVDT's foram pressas aos pinos por porcas de latão; foram colocados dois pares (porca e contra porca) acima e abaixo das chapas para evitar que estas se mexessem com a vibração produzida pela esmerilhadeira no momento da perfuração do furo central.

O sistema de aquisição de dados foi ligado depois de montados os LVDT's. Foram tomadas leitura de voltagem em intervalos de tempo até que as leituras estabilizassem.

Adicionalmente dos isolantes colocados nos LVDT's, todo o sistema foi coberto com protetores plásticos para garantir a não entrada de água no sistema.

Após o tempo de estabilização, começou a etapa de perfuração do furo central. Os primeiros tramos foram perfurados com a broca adiamantada de 5 cm de comprimento, depois a broca foi trocada por outra de 45 cm. Durante a perfuração foram tomadas leituras de voltagem cada dois ou três minutos até que a

broca atingiu uma profundidade de 30 cm, nesse intervalo a perfuração foi parada e foram tomadas leituras de voltagem que seriam as correspondentes ao estágio de relaxação da rocha (resposta da rocha a solicitações de descarregamento por efeito da perfuração).

Em seguida o sistema de aquisição de dados foi desligado e desmontado, continuando-se a perfuração sem o monitoramento das deformações da rocha até alcançar uma profundidade de 45 cm, momento no qual foi retirado o testemunho de dentro do furo acabando assim o primeiro estágio que foi a de medição das tensões *in situ*.

O estágio da pressurização começou com a montagem dos LVDT's nos pinos e com o período de estabilização das leituras. Quando os transdutores apresentaram valores constantes de voltagem foi dado início à pressurização. O pressiômetro foi inserido dentro do furo e foi injetada pressão de óleo na membrana com o macaco hidráulico. O processo de pressurização foi feito em intervalos de pressão: quando foi atingido o valor de pressão requerida (geralmente estes valores dependem da faixa de pressão necessária para deformar a rocha) a válvula foi fechada e foram tomadas leituras de voltagem, depois a válvula foi aberta e continuou-se injetando pressão de óleo em valores maiores, sendo a válvula novamente fechada; o processo continua sucessivamente até que se atingissem valores de voltagem que representassem faixas de deslocamentos significativos da rocha. Depois a válvula foi aberta progressivamente (ciclo de descarregamento) e foram tomadas leituras em intervalos de pressão. Foram feitos vários estágios de carregamento e descarregamento, incrementando-se os valores de pressão em cada estágio.

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 km², 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.

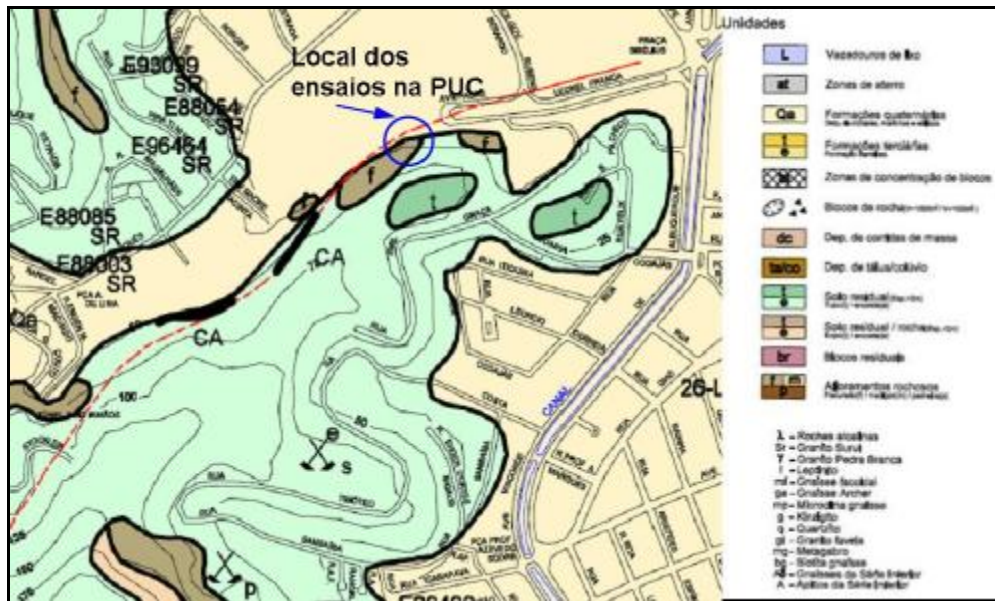


Figura 7.1 – Mapa geológico – geotécnica do local do ensaio na PUC, extraído de Georio, 2007.

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.

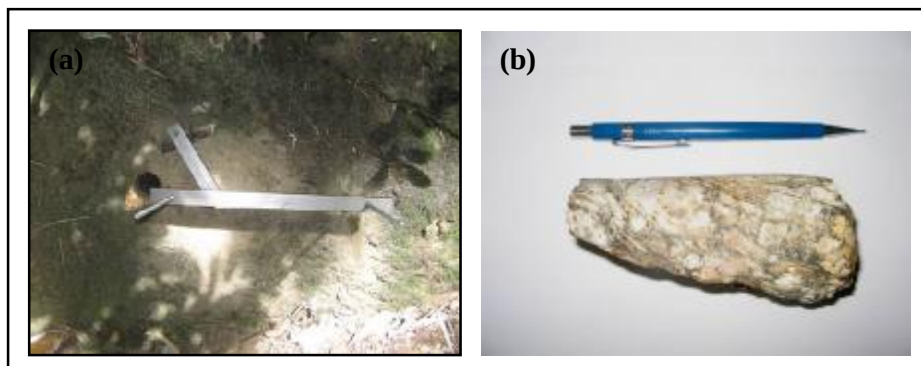


Figura 7.3 – (a) Momento de secagem do cimentante com os gabaritos de aço, (b) amostra obtida como produto da perfuração.

Após a execução dos furos, inserção e fixação dos pinos são montados os LVDT's (ver figura 7.4), seguidamente o pressiômetro 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.

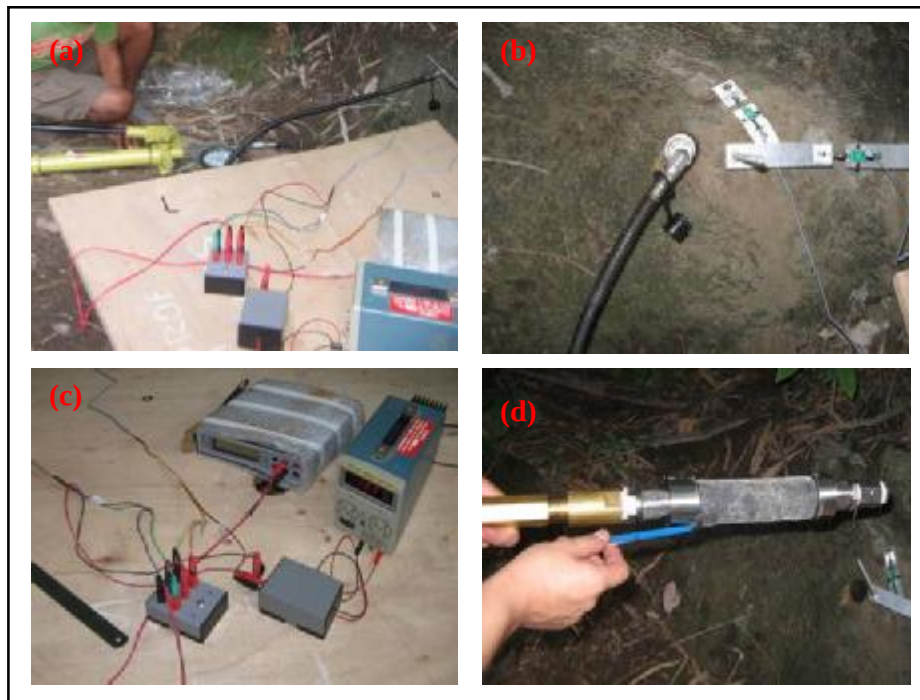


Figura 7.5 – (a), (b) Estágio de pressurização do furo, (c) sistema de instrumentação para medir os deslocamentos gerados, (d) estado da membrana expansível depois da pressurização.

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 gnaiss, chamado de leptinito - microclina gnaiss (Britto *et al*, 1999) finamente laminado.

O maciço rochoso exibe 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 bandada 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.

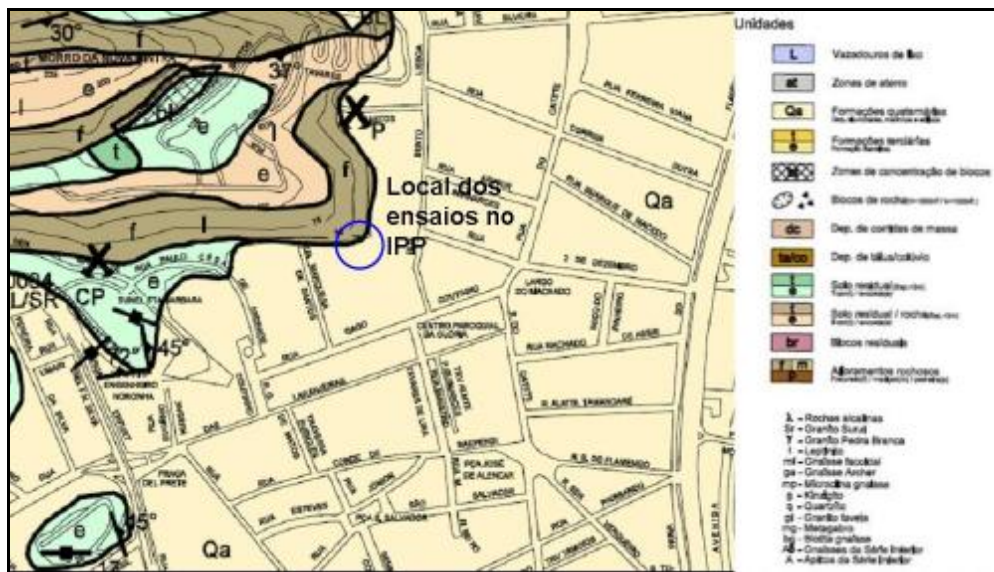


Figura 7.6 – Mapa geológico - geotécnica do local onde foram feitos os ensaios no IPP, extraído do Georio, 2007.

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

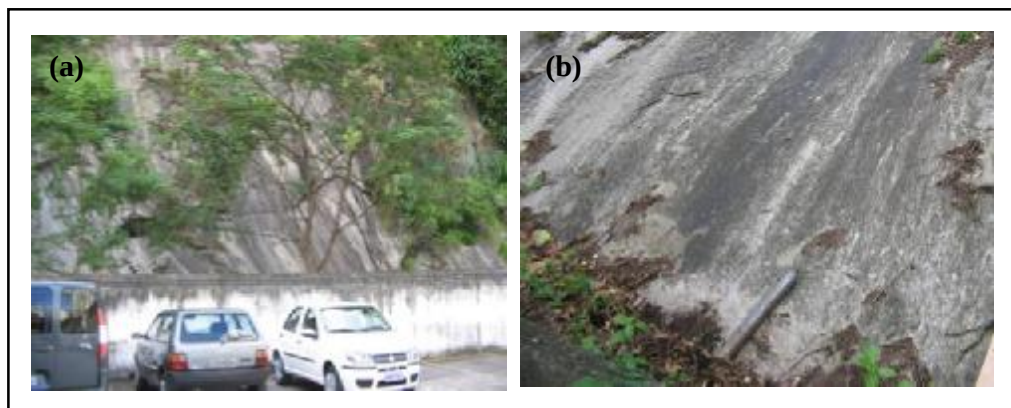


Figura 7.7 – (a) Fundos do pátio do estacionamento do IPP, (b) Vista mais de perto do maciço rochoso.

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 martelo, (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.

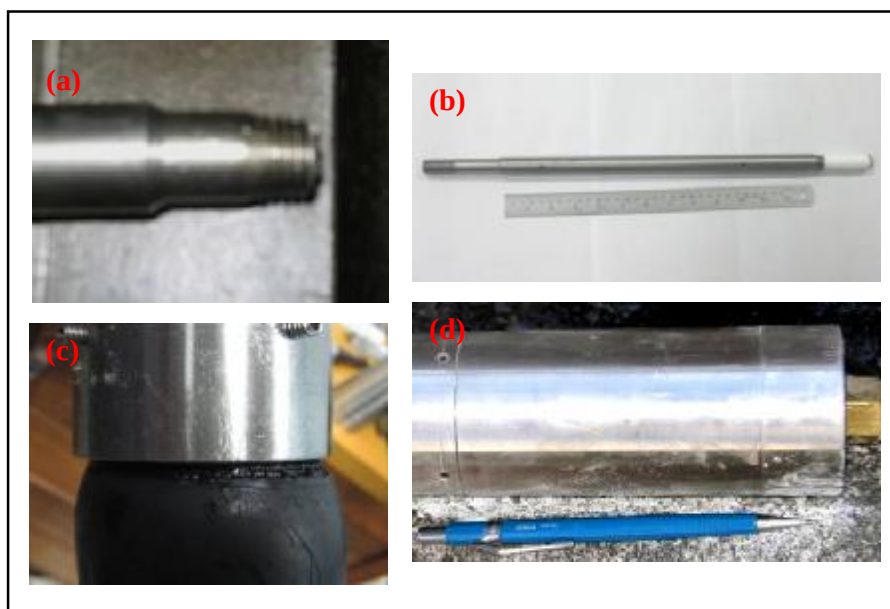


Figura 7.10 – (a) Parte do eixo central quebrado durante o ensaio, (b) Novo modelo do eixo central, (c) fissura gerada no contato anel - membrana, (d) camisa de aço reforçando o equipamento.

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.

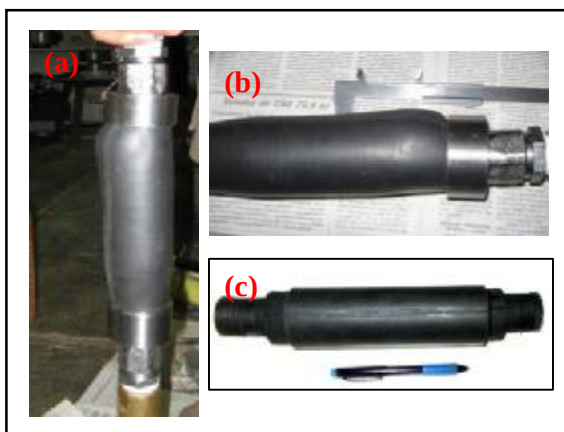


Figura 7.11 – (a), (b) expansão pouco uniforme da membrana ao ar, (c) modelo da nova membrana.

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.

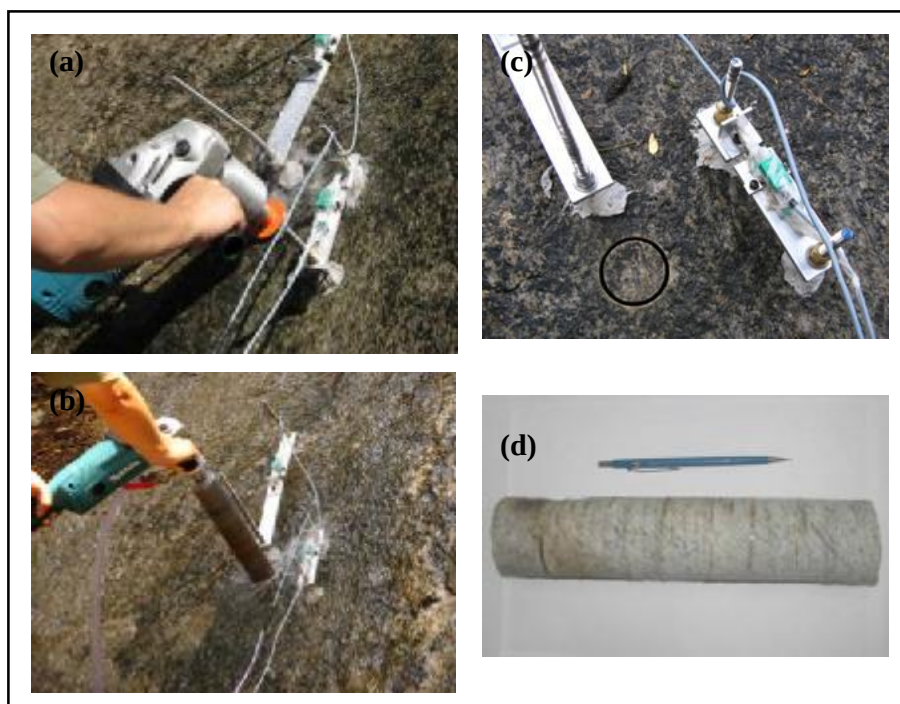


Figura 7.13 – (a) Início da perfuração do furo central com a broca de 50 mm, (b) monitoramento da rocha no momento da perfuração, (c) estado dos LVDTs depois da perfuração, (d) testemunho de rocha obtida da perfuração

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 vez 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.

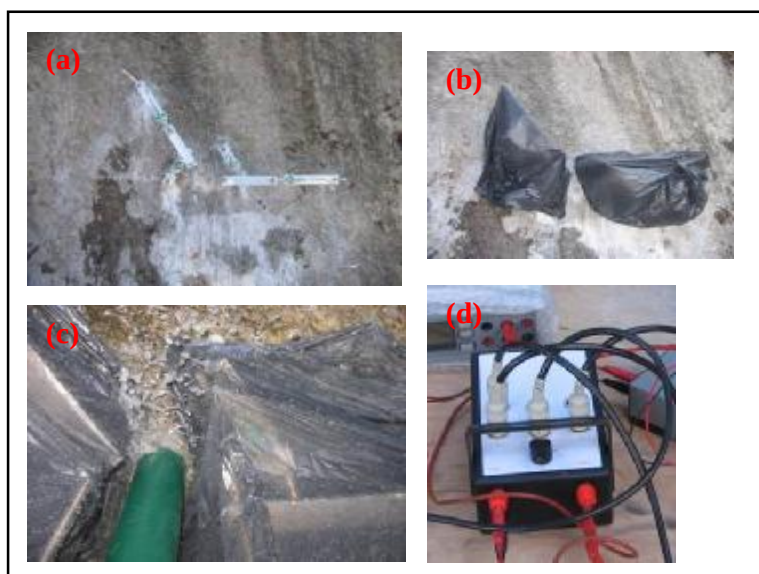


Figura 7.14 – (a) Disposição dos LVDTs no furo IPP-3, (b) protetores plásticos cobrindo todo o sistema de monitoramento dos deslocamentos, (c) momento da perfuração, detalhe da água espirrando sobre os protetores plásticos, (d) caixa seletora usada neste ensaio.

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, fui 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.

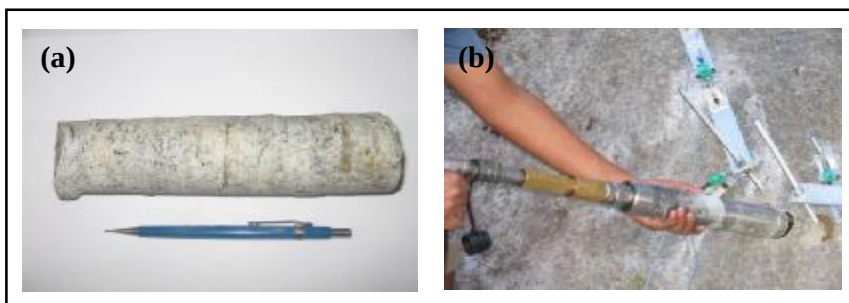


Figura 7.15 – (a) Parte do testemunho de rocha obtida no terceiro furo do IPP (IPP-3), (b) momento da inserção do pressiômetro dentro do furo.

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.

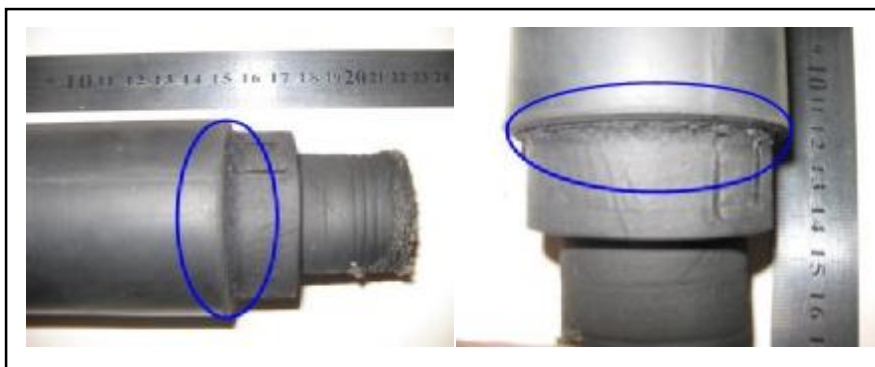


Figura 7.16 – Detalhe da fissura, bordos e degraus da membrana.

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° 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.

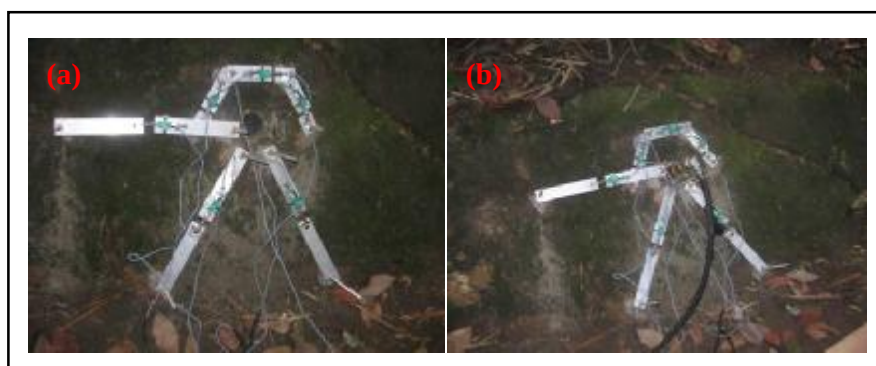


Figura 7.17 – (a) Disposição dos LVDTs ao redor do segundo furo realizado na P.U.C (PUC-2), (b) início da pressurização do furo PUC-2.



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-los, 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

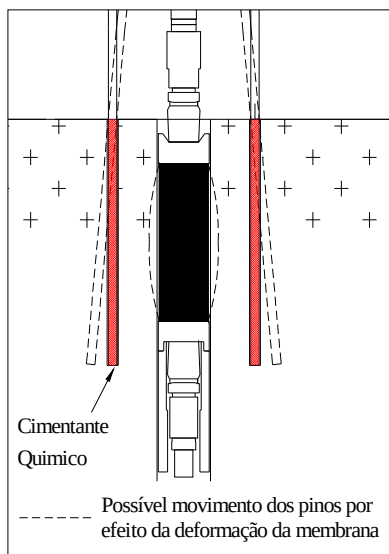


Figura 7.19 – Esquema que mostra o possível comportamento dos pinos por efeito da deformação da membrana.

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 cimento 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.

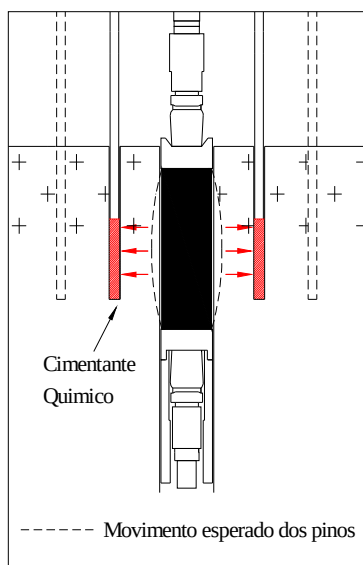


Figura 7.20 – Projeto do novo esquema adotado e o comportamento esperado dos pinos dentro do furo.

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 mostrado na forma gráfica na figura 7.23.



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

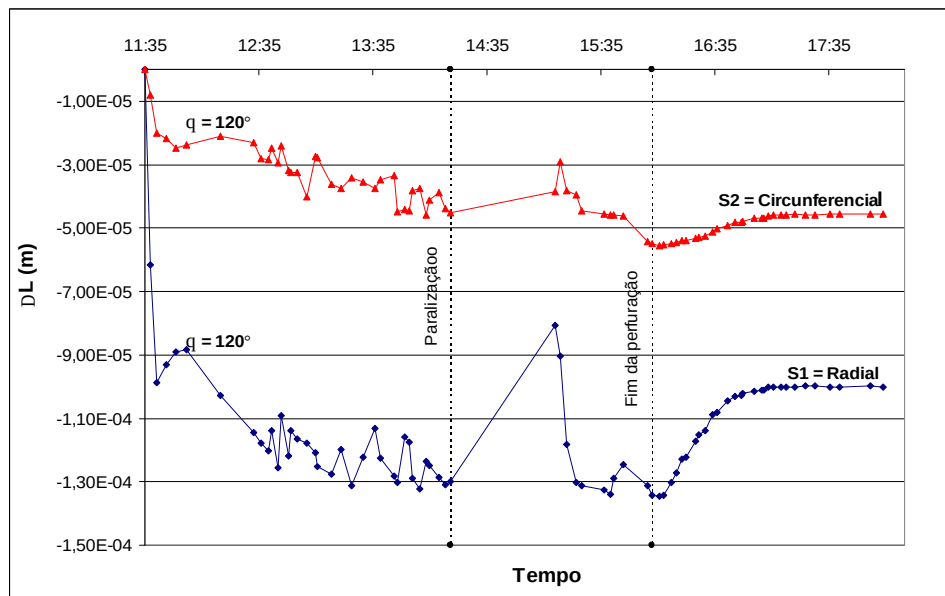


Figura 7.23 – Deslocamentos obtidos durante e após a perfuração (ensaio IPP-2).

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 maior e o eixo x), das magnitudes das tensões principais e das propriedades mecânicas do material (E , u). 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.

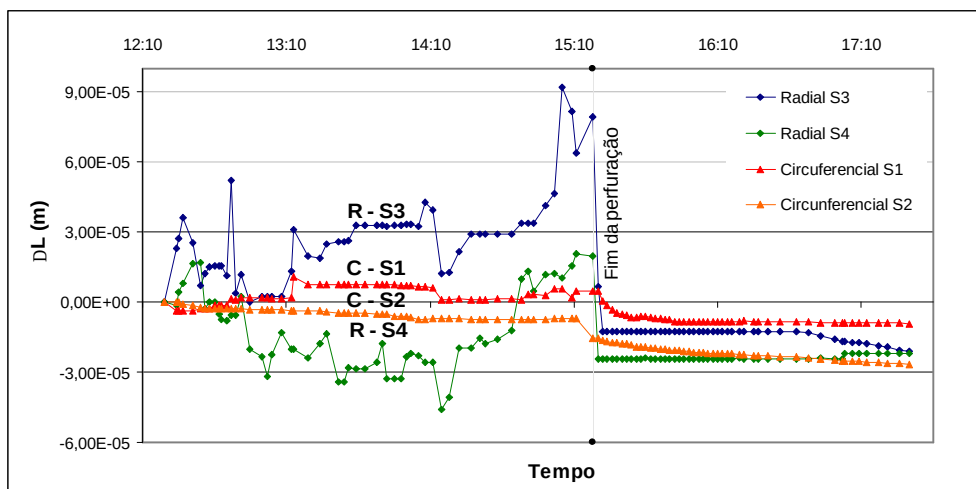


Figura 7.25 – Deslocamentos obtidos durante e após a perfuração (ensaio IPP-2).

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 σ_1 se apresentou menor que o valor de σ_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 σ_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 σ_2 maior que σ_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. Apparently 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.

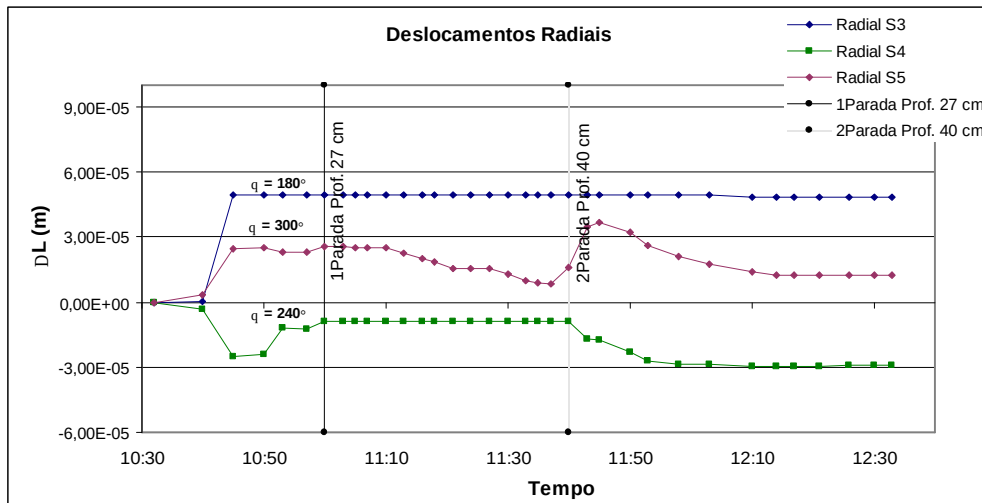


Figura 7.27 – Deslocamentos radiais dos LVDT's com o tempo (ensaio PUC-3).

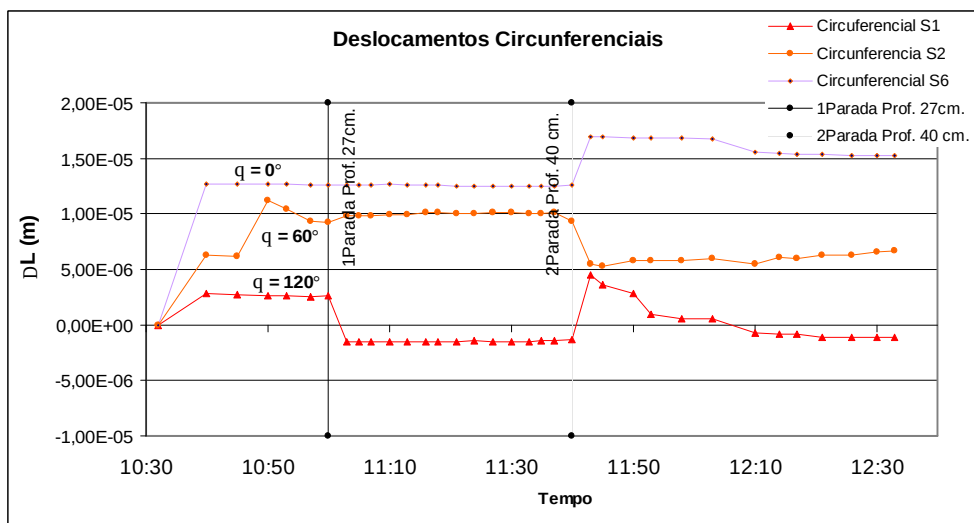


Figura 7.28 – Deslocamentos circunferenciais dos LVDT's com o tempo (ensaio PUC-3).

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° 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.

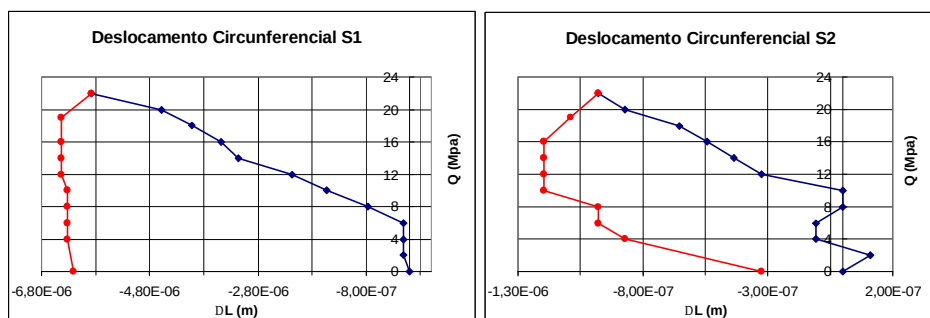


Figura 7.29 – Deslocamentos circunferenciais obtidos no ensaio IPP-3.

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.

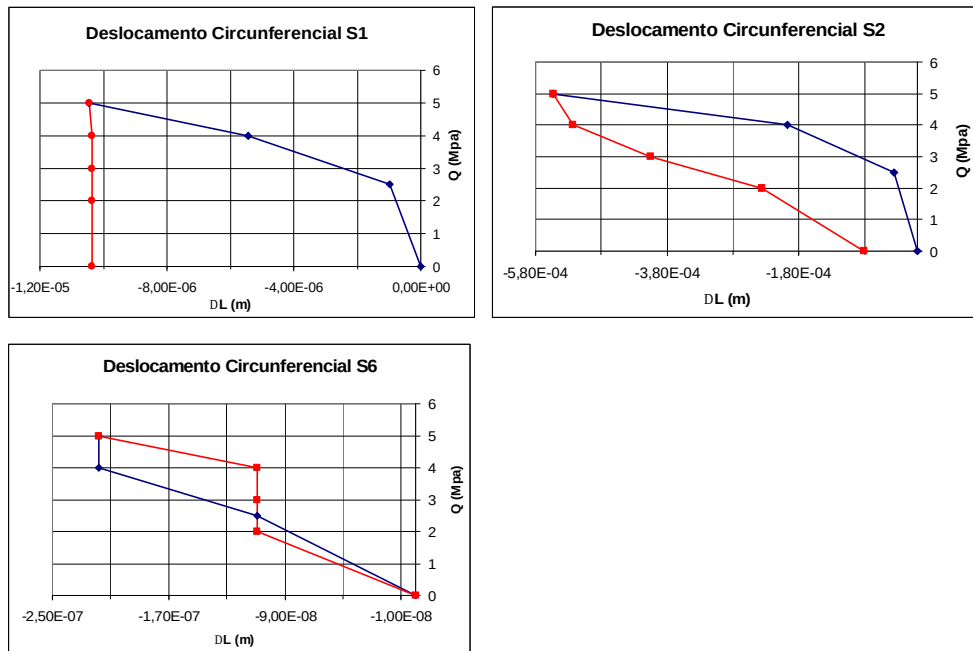
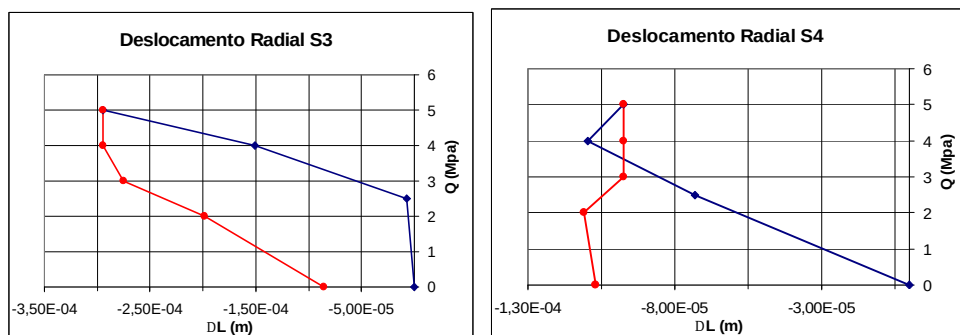


Figura 7.30 – Deslocamentos circunferenciais obtidos no ensaio PUC-2, local A.



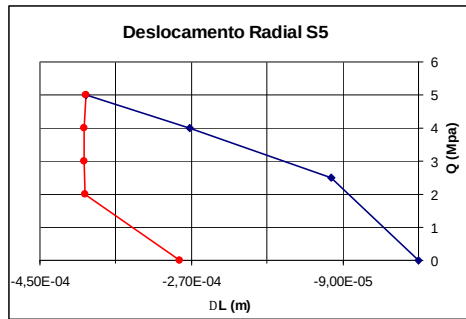
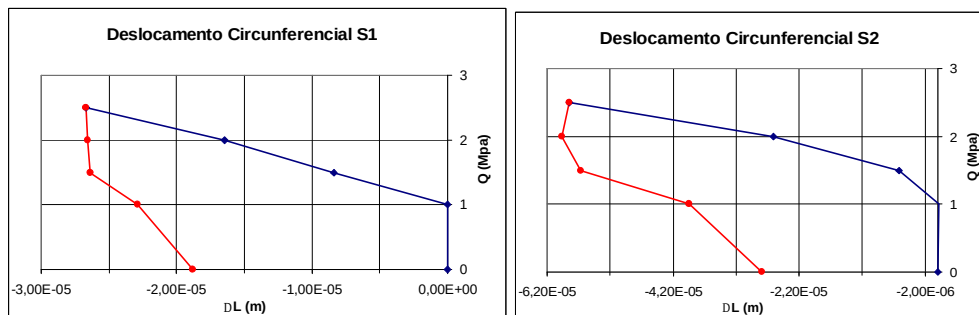


Figura 7.31 – Deslocamentos radiais obtidos no ensaio PUC-2, local A.

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

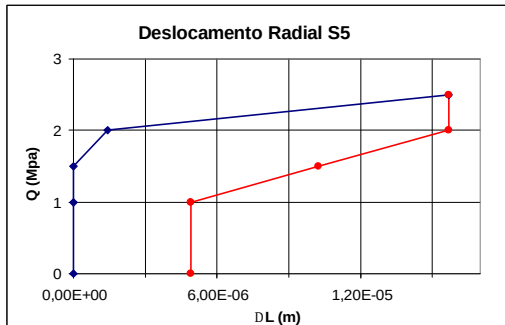
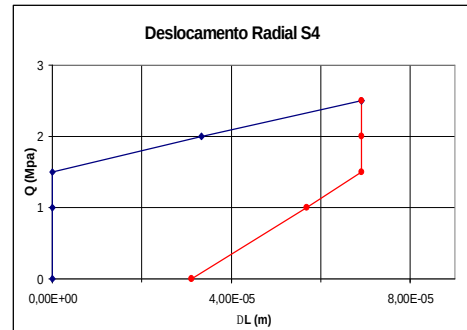


Figura 7.33 – Deslocamentos radiais obtidos no ensaio PUC-3, local B.

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.

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

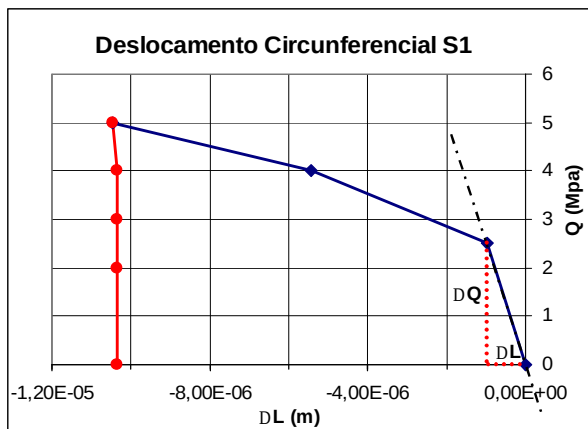


Figura 7.34 – Exemplo de procedimento para a obtenção de G .

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.

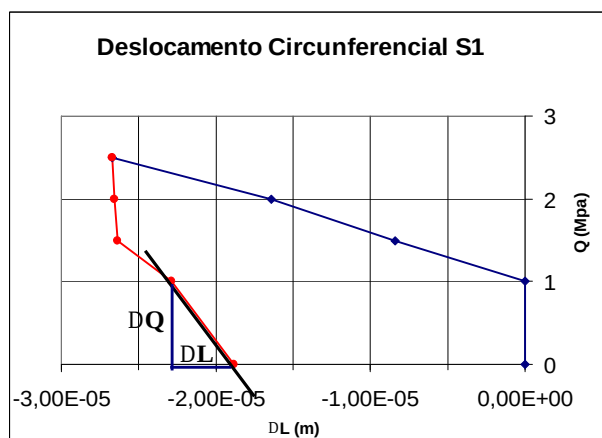


Figura 7.35 – Exemplo de procedimento para a obtenção de G na fase de descarregamento

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	Gnaiss augen facoidal	1528
Local B – PUC	Gnaiss 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	Gnaiss augen facoidal	1528	-
Local B – PUC	Gnaiss 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 gnaiss 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.

Local	Tipo de Rocha	Módulo E (MPa)	Grau de Intemperismo
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° e 45° 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 $u = 0,21$.

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_d (GPa)	n_d	E_e (GPa)	n_e	E_e (GPa)	n_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.

8

Conclusões e Sugestões

8.1.

Conclusões

O aparelho desenvolvido nesta pesquisa mostrou ter um bom funcionamento em rochas brandas, já em rochas mais duras o funcionamento não foi satisfatório, pois os dados obtidos foram muito dispersos devido a que a faixa de deslocamento obtida em rocha são encontra-se no limite da sensibilidade dos transdutores.

Apesar de testadas muitas membranas nenhuma delas demonstrou ter a suficiente capacidade de flexibilidade e resistência que permita trabalhar na faixa de pressões necessária para fazer ensaios de medição de deformabilidade em rocha são.

O sistema de instrumentação projetado depois de ser submetido a muitas melhoras conforme eram executados os ensaios foi em linhas gerais satisfatório no monitoramento de deslocamentos em rochas intemperizadas, porém em rocha são onde a faixa de deslocamentos é menor, os LVDT's não conseguiram ter leituras uniformes de voltagem. Já nos estágios de descarregamento (medição das tensões *in situ*) o desempenho dos transdutores não foi eficiente, sendo estes muito sensíveis à vibração da perfuratriz, à água utilizada na execução do furo e a fatores ambientais como o vento e a temperatura.

As trincas geradas durante o estagio de pressurização nos maciços rochosos ensaiados na PUC foram originadas através dos planos de xistosidade da rocha, o mergulho das mesmas é paralelo a subparalelo à xistosidade, constituindo esta estrutura geológica o principal ponto de fraqueza do maciço.

Através dos resultados obtidos nos ensaios executados, conclui-se que o módulo de deformabilidade decresce conforme se incrementa a intensidade do intemperismo, o qual se vê refletido nos valores encontrados nos maciços rochosos ensaiados.

A faixa de valores do módulo de deformabilidade obtidos pelo método do pressiómetro guarda relação com a classificação feita no maciço rochoso pelo grau de alteração, apresentando valores de 518 MPa, para a rocha classe IV (rocha mais intemperizada), 1528 MPa para a rocha classe III e 30466 Para a rocha classe I (rocha sã).

O método empregado para a determinação das tensões *in situ* não teve um bom desempenho, os dados de deslocamentos registrados, foram muito dispersos, mostrando diferentes comportamentos de relaxação para uma mesma rocha, concluindo-se que os transdutores empregados são muito susceptíveis as condições de contorno do ensaio.

8.2.

Recomendações

A perfuração manual do furo traz consigo uma série de vantagens como a facilidade de movimentação, transporte, montagem e baixo custo, em contrapartida não garante um avance uniforme da perfuração, e não tem se controle da direção nem da inclinação do furo pois depende muito da capacidade e pulso do encarregado da perfuração, além de ser demorada e bastante cansativa. Contudo a perfuração pode ser melhorada com o emprego de maquinas mais potentes que garantissem um avance mais eficaz do furo.

Implementar um sistema de registro em tempo real para o monitoramento dos deslocamentos, dessa maneira podem ser instalados os 12 LVDT's que era a idéia original, desta maneira teria se um maior volume de dados.

Avaliar o emprego de strain gauge para medição das deformações, estes sensores são menos sensíveis à vibração e são mais resistentes à água.

Desenvolver um método de minimização para rocha anisotrópica e fazer uma comparação com os valores obtidos com o modelo isotrópico.

BIBLIOGRAFIA

ALMEIDA, M.R.S. (1987) **Propriedades Mecânicas de Rochas Associadas ao Grau de Intemperismo**. Dissertação de Mestrado, PUC-Rio, Rio de Janeiro.

AMADEI, B. & STEPHANSSON, O. (1997). **Rock Stress and Its Measurement**. Chapman & Hall, London, UK, 490p.

BRITTO, H.G., AMARAL, C., MAIA, H. S. (1999) **Mitigation of an Unstable Rock Slope in Laranjeiras, Rio de Janeiro**, Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering; International Society of Soils Mechanics and Geotechnical Engineering/ABMS; Foz do Iguaçu; Brasil.

BARROSO, E.V. (1993) **Estudo das Características Geológicas e do Comportamento Geotécnico de um Perfil de Intemperismo em Leptinito**. Dissertação de Mestrado, 251p. Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

BELLO, L.A.L. (2004) **Desenvolvimento de um Pressiômetro de Cravação com Aplicação na Determinação de Propriedades Mecânicas de Resíduos sólidos**. Dissertação de Mestrado, PUC-Rio, Rio de Janeiro.

BRADY, B. H. G & BROWN, E. T. (1994). **Rock Mechanics for Underground Mining**. Second Edition. Chapman & Hall ed. 571p.

DEERE & PATTON (1971). **Slope Stability in Residual Soils**. 4 COPAMSEF, State of the Art., vol.1, pp.87-170.

FARMER, I. W. (1968). **Engineering Properties of Rocks**. Spon Editors, London.

FIGUEIREDO, R. P. (2007) **Deslocamentos em um Cilindro de Parede Espessa em Deformação Plana**, comunicação pessoal.

GALERA, M. J., ALVAREZ, M., BIENAWSKI, Z. T., (2005) **Proceed. International Symposium 50 years of Pressuremeter**, ISP5 - PRESSIO 2005, 2005, Paris. Proceedings of Proceed. International Symposium 50 years of Pressuremeter, ISP5 - PRESSIO 2005, p. 1-16

GOODMAN, R. E. (1989). **Introduction to Rock Mechanics**. Second Edition. John Wiley & Sons. 562p.

GALYBIN, A. N., DYSKIN, A. V., TARASOV, B. G., & JEWELL, R. J. (1999). **An Approach to Large-Scale Field Stress Determination**. Geotechnical and Geological Engineering., vol.17, pp.267-289.

GALYBIN, A. N., DYSKIN, A. V., & JEWELL, R. J. (1997). **A Measuring Scheme for Determining *in situ* Stresses and Moduli at Large Scale**. Int. J. of Rock Mech. Min. Sci. Abstr., vol.34, pp.157-162.

GEOLOGICAL SOCIETY (1977). **The Description of Rock Masses for Engineering Purposes**. Geological Society Group Working Party Report, Q.J. Eng. Geol., N 10, pp.295-381.

GEORIO, **Carta Geológico-Geotécnica do Município do Rio de Janeiro**, disponível em <http://www.rio.rj.gov.br/georio/servicos/>, acessado em 18/07/2007.

GOODMAN, R. E. (1989). **Introduction to Rock Mechanics**. Second Edition. John Wiley & Sons. 562p.

GOODMAN, R. E. (1993). **Engineering Geology: Rock In Engineering construction**. First Edition. John Wiley & Sons. 412p.

HEES, F.J. (1996) **Utilização da Técnica do Doorstopper Modificada na Determinação de Tensões *In Situ* em Maciços Rochosos**. Dissertação de Mestrado, PUC-Rio, Rio de Janeiro.

HOEK E., DIEDERICHS M.S. (2005). **Empirical Estimation of Rock Mass Modulus**, Int. J. of Rock Mech. Min. Sci. Abstr., vol.43, pp.203-215.

HOEK, E. & BROWN, E. T.(1982). **Underground Excavations in Rock**. The Institution of Mining and Metallurgy, London, England, 527p.

ITO, T., SATO, A., HAYASHI, K. (2001). **Laboratory and Field Verification of New Approach to Stress Measurements Using a Dilatometer Tool**, Int. J. of Rock Mech. Min. Sci. Abstr., vol.38, pp.1173-1184.

ISRM (1981). **Rock Characterization, Testing and Monitoring suggested Methods**. Brown, London, Pergamon Press. 211p.

ISRM (1981b). **Basic Geotechnical Description of Rock Masses**, Int. J. of Rock Mech. Min. Sci. Abstr., vol.18, pp.85-110.

JAEGER, J. C. & COOK, N. G. W. (1969). **Fundamentals of Rock Mechanics**. Methuen, London, Chapman and Hall, 513p.

JUMIKIS, A.R. (1983). **Rock Mechanics**. Trans Tech, 613p.

KAYABASI, A., GOKCEOGLU, C., ERCANOGLU, M. (2003). **Estimating the Deformation Modulus of Rock Masses: a Comparative Study**, Int. J. of Rock Mech. Min. Sci. Abstr., vol.40, pp.55-63.

LEET & JUDSON, (1995). **Fundamentos de Geología Física**. Mexico, Editorial Limusa, 551p.

LIANYANG Z., EINSTEIN H.H. (2003). **Using RQD to Estimate the Deformation Modulus of Rock Masses**, Int. J. of Rock Mech. Min. Sci. Abstr., vol.41, pp.337-341.

MIRANDA, T., SOUSA, R. L. (2006). **Determinação de Parâmetros Geomecânicos em Formações Rochosas e Maciços Heterogêneos**, disponível em <http://193.136.14.136/cec/revista/revista.htm>, acessado em 20/06/2007.

MELFI A. J. ; CERRI C. C. ; KRONBERG B. I. ; FYFE W. S. ; MCKINNON B. (1983). **Granitic Weathering: a Brazilian Study**, Journal of Soil Science, Vol. 34, pp. 841-851.

NASCIMENTO, A. C.F.; **Modelagem Geométrica no Maciço do Morro Dois irmãos com base na Geologia Estrutural de Detalhe**. Monografia de fim de curso, UERJ, Rio de Janeiro.

OBERT, L; DUVALL, W. (1967) **Rock Mechanics and the Design of Structures in Rock**, John Wiley & Sons. 650p

OLIVEIRA, A.M.S.; BRITO, S.N.A. (1998) **Geologia de Engenharia**. São Paulo: ABGE.

PUSH, R. (1995). **Rock Mechanics on a Geological Base**, Elsevier, Amsterdam, 498p.

SERATA, S., SAKUMA, S., KIKUCHI, S., MIZUTA, Y. (1992) **Double fracture method of in situ stress measurement in brittle rock**, Rock Mechanics and Rock Engineering, N25, pp. 89-108.

SERTÃ, M.B. (1986) **Aspectos Geológicos e Geotécnicos do Solo Residual do Campo Experimental II da PUC-RJ**. Dissertação de Mestrado, PUC-Rio, Rio de Janeiro.

TEIXEIRA, W.; TOLEDO, M. C. M.; FAIRCHILD, T. R.; TAIOLI, F. (2000) **Decifrando a Terra**. São Paulo: Oficina de Textos, 557 p.

TIMOSHENKO, S.P.; GOODIER, J.N. (1980) **Teoria da Elasticidade**. Editora Guanabara Dois, Rio de Janeiro. 3a Edição, 545p.

VALLEJO, L. I. G., FERRER, M., ORTUÑO, L. & OTEO, C. (2002) **Ingeniería Geológica**. Prentice Hall, Madrid, 374-390p.

VARGAS, M.(1953) **Some Engineering Properties of Residual Clay Soils occurring in Southern Brazil**, Proc. 3rd International Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Zurich, Switzerland V. I , p.84-90.

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)