



**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



**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 Gnaisse 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. Calculo 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 Gnaisse 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 pressiômetro	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 $(u_r, u_\theta)$ 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 pressiômetro.	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 pressiômetro.	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 primaria, (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 – Martelete 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 martetele, (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 – Ensaio <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
$E_b$	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
$l_i$	Comprimento inicial
$l_f$	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

$a$  Ângulo entre o vetor  $I_{mm}$  e a direção positiva do eixo  $x$

$b$  Ângulo entre a foliação da rocha e a direção de carregamento

$\Delta l$  Variação de distância ou espaço entre duas partículas

$\Delta L$  Deslocamento entre dois pinos

$\Delta V$  Variação de Voltagem

$\Delta Q$  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  $x$

$\Lambda_c$  Vetor de deslocamento circunferencial

$\Lambda_r$  Vetor de deslocamento radial

$q$  Coordenada polar

$g$  Deformação cisalhante

$I_a$	Parâmetro de Lamé do aço
$I_b$	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
$u$	Coefficiente de Poisson
$u_a$	Coefficiente de Poisson do aço
$u_b$	Coefficiente de Poisson da borracha
$u_r$	Coefficiente de Poisson da rocha
$\Psi$	Deformação angular