



**Tiago Proto da Silva**

**Resistência ao Arrancamento de Grampos em Solo  
Residual de Gnaisse**

**Dissertação de Mestrado**

Dissertação apresentada ao Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências de Engenharia Civil: Geotecnia.

Orientadores: Alberto S. F. J. Sayão  
Anna Laura L. S. Nunes

Rio de Janeiro  
Setembro de 2005



**Tiago Proto da Silva**

**Resistência ao arrancamento de grampos em solo residual  
de gnaïsse**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Departamento de Engenharia Civil do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

**Prof. Alberto Sampaio Ferraz Jardim Sayão**  
Presidente Orientador  
Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

**Profª Anna Laura Lopes da Silva Nunes**  
Co-Orientador  
COPPE/UFRJ

**Dr. Sandro Salvador Sandroni**  
Geoprojetos Eng. Ltda

**Profº Willy Alvarenga Lacerda**  
COPPE/UFRJ

**Prof. Sérgio Augusto Bezerra Fontoura**  
Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

**Prof. José Eugênio Leal**  
Coordenador Setorial  
do Centro Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 01 de setembro de 2005

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

### **Tiago Proto da Silva**

Graduou-se em Engenharia Civil, pela Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC), em agosto de 2003. Participou de projetos de pesquisa com o Laboratório de Geotecnia da UDESC, desenvolvendo ensaios de campo e laboratório utilizados na prática da engenharia geotécnica. Ingressou no curso de mestrado em Engenharia Civil da PUC-Rio em agosto do ano de 2003, atuando na área de Geotecnia Experimental, trabalhando com instrumentação, ensaios de campo e ensaios especiais de laboratório.

#### Ficha Catalográfica

Silva, Tiago Proto da

Resistência ao arrancamento de grampos em solo residual de gnaiss / Tiago Proto da Silva ; orientadores: Alberto S. F. J. Sayão, Anna Laura L. S. Nunes. – Rio de Janeiro : PUC, Departamento de Engenharia Civil, 2005.

144 f. : il. color. ; 30 cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil.

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia civil – Teses. 2. Geotecnia. 3. Solo grampeado. 4. Resistência ao arrancamento. 5. Resistência de interface. 6. Solo residual de gnaiss. I. Sayão, Alberto S. F. J. II. Nunes, Anna Laura L. S. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. IV. Título.

CDD: 624

## **Agradecimentos**

À força maior que nos guia, que nós católicos chamamos de Deus, por iluminar o meu caminho e fazer com que cada vez mais eu acredite que a educação é forma mais sensata de desenvolvimento da sociedade.

Aos meus pais por sempre acreditarem em meus sonhos e criar caminhos para que eles se tornem realidade.

Aos meus irmãos que mesmo com as divergências de pensamento colaboraram muito para meu desenvolvimento pessoal.

Ao orientador Alberto Sayão pela sua amizade, orientação e pela sua grande capacidade técnica. Obrigado pela objetividade, por sua sensatez e compreensão.

À minha orientadora e amiga Anna Laura Nunes por me fazer enxergar e pensar nas melhores soluções, por acreditar na minha capacidade, pela sua amizade, por seu companheirismo e precisão na resolução de meus problemas. O meu muito obrigado.

Aos professores e amigos Edson Fajardo e Edgar Odebrecht que, de alguma forma, despertaram o meu interesse por esta área da engenharia.

Ao mestre amigo e conselheiro Julio Macías que discutiu e acompanhou todos os passos de desenvolvimento do presente trabalho.

Ao grupo de trabalho que se desenvolveu ao longo da Pesquisa, André, Saré, Alex, Fernanda e Marcelo, muito obrigado por tudo.

Aos colegas da sala 609, André Muller, Fred, Diego e Adenílson pelo companheirismo, apoio e, principalmente, pela paciência neste período que trabalhamos juntos.

A todos os funcionários, e em especial a Ana Roxo, Amaury e Seu José.

Aos colegas da PUC-Rio, em especial Christiano, Thiago e Ygor que muitas vezes me deslocaram do trabalho para a escrivaninha do bar, e lá, vários problemas foram resolvidos, ou, ao menos, davam dor de cabeça no outro dia.

À SEEL Engenharia Ltda, por abrir as portas da empresa para o desenvolvimento do trabalho, e acreditar que o fomento à pesquisa é desenvolvimento empresarial.

## Resumo

Silva, Tiago Proto da; Sayão, Alberto de Sampaio Ferraz Jardim; Nunes, Anna Laura Lopes S.. **Resistência ao Arrancamento de Grampos em Solo Residual de Gnaissé**. Rio de Janeiro, 2005. 144p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A presente pesquisa trata da avaliação da resistência ao arrancamento de grampos em solo residual de gnaissé. Foram realizados ensaios de arrancamento em uma obra de solo grampeado executada em um maciço de solo residual de gnaissé. A resistência ao arrancamento foi avaliada em 4 cotas diferentes ao longo do perfil de escavação. Foram realizados 8 ensaios de arrancamento em grampos de 4m de comprimento. Quatro ensaios foram executados em grampos instrumentados com *strain gages*, para avaliar a distribuição das cargas durante os estágios de carregamento. Foram também realizados ensaios de cisalhamento direto no solo e na interface solo/nata de cimento para avaliação das propriedades mecânicas destes materiais. As amostras indeformadas foram coletadas imediatamente à frente dos furos de instalação dos grampos ensaiados garantindo uma maior representatividade dos materiais. Uma relação semi-empírica é proposta para se avaliar a resistência ao arrancamento de grampos, baseada nos parâmetros de resistência do solo e da interface solo/nata de cimento, obtidos em ensaios de cisalhamento direto no laboratório. Os resultados obtidos nesta pesquisa são comparados com ensaios realizados por outros autores, em encostas de solos residuais de gnaissé e empregados para validação da relação desenvolvida.

## Palavras-chave

Geotecnia; solo grampeado; resistência ao arrancamento; resistência de interface, solo residual de gnaissé.

## Abstract

Silva, Tiago Proto da; Sayão, Alberto de Sampaio Ferraz Jardim (Advisor); Nunes, Anna Laura Lopes S. (Advisor). **Pullout strength of nails in gneissic residual soil.** Rio de Janeiro, 2005. 144p. Msc. Dissertation – Department of Civil Engineering, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The present research presents an evaluation of the pullout resistance of nails in residual gneissic soil. Pullout tests were carried out in 4 different levels of the nailed wall with nails 4m long. Four tests were carried out in strain-gauged nails for evaluating the tension distribution along the nail. A series of direct shear tests in soil specimens and in the soil/grout interface were also performed for obtaining the mechanical properties of these materials. Undisturbed samples had been collected very close to the pull-out test locations. A semi-empirical relation is proposed for evaluating the pullout resistance of nails, based on the shear strength parameters of the soil and of the soil/grout interface from laboratory direct shear tests.

## Keywords

Geotechnical engineering; soil nail; pull-out strength; interface strength; gneissic residual soil.

## Sumário

1. Introdução	19
2. Revisão bibliográfica	22
2.1. Aspectos gerais de solo reforçado	22
2.2. Solo grampeado	23
2.2.1. Origem e definição da técnica	23
2.2.2. Aplicações	24
2.2.3. Vantagens e limitações	25
2.3. Mecanismo de transferência de carga solo-grampo	26
2.3.1. Transferência de carga no período da escavação	29
2.4. Ensaios para determinação da interação solo-reforço	30
2.4.1. Ensaios de laboratório	31
2.4.1.1. Cisalhamento direto	32
2.4.1.2. Modelos reduzidos	36
2.4.1.3. Arrancamento no laboratório	38
2.4.2. Ensaios de arrancamento no campo	39
2.4.2.1. Transferência de carga no arrancamento	41
2.4.3. Métodos empíricos de determinação da interação solo-grampo	44
2.5. Casos de obra com ensaios de arrancamento	47
3. Programa experimental de campo	50
3.1. Área de estudo	50
3.1.1. Geologia local	50
3.1.2. Ensaios SPT	51
3.2. Características dos grampos	53
3.3. Instrumentação das barras de arrancamento	54
3.4. Ensaios de calibração das barras	57
3.5. Execução dos ensaios de arrancamento	60
3.5.1. Procedimentos de ensaio	61
3.5.2. Resultados obtidos	63
4. Programa experimental de laboratório	74



4.1. Ensaio de caracterização	75
4.2. Ensaio de cisalhamento direto	77
4.2.1. Cisalhamento direto no solo	77
4.2.2. Cisalhamento direto na interface solo-cimento	82
4.2.2.1. Moldagem dos corpos-de-prova	82
4.2.2.2. Preparação da nata de cimento	84
4.2.2.3. Definição da rugosidade dos corpos-de-prova	85
4.2.2.4. Execução dos ensaios de interface	86
4.3. Resultados de cisalhamento direto	91
5. Análise dos resultados	92
5.1. Ensaio de cisalhamento direto	93
5.1.1. Coeficiente de interface	95
5.2. Resistência ao arrancamento	97
5.2.1. Avaliação das tensões atuantes nos grampos	97
5.3. Estimativa da resistência ao arrancamento	102
5.4. Avaliação da relação proposta para estimativa da resistência ao arrancamento	107
5.5. Consideração do efeito da sucção na análise dos resultados	111
6. Conclusões	115
7. Referências Bibliográficas	118
8. Apêndice 1	127
9. Apêndice 2	136

## Lista de Figuras

FIGURA 1 - COMPORTAMENTO TÍPICO DE SOLO: (A) SEM REFORÇO; E (B) COM REFORÇO (SIEIRA, 2003).	23
FIGURA 2 – TÉCNICAS DE EXECUÇÃO DE TÚNEIS COM REVESTIMENTO (A) FLEXÍVEL E (B) RÍGIDO (ORTIGÃO E SAYÃO, 1999).	24
FIGURA 3 - APLICAÇÕES USUAIS DE SOLO GRAMPEADO (ORTIGÃO E SAYÃO, 1999).	25
FIGURA 4 - COMPORTAMENTO DE REFORÇOS: (A) FLEXÍVEIS E (B) RÍGIDOS (MITCHELL E VILLET, 1987).	27
FIGURA 5 - ZONAS ATIVA E PASSIVA EM ESCAVAÇÕES COM GRAMPOS LIVRES (SPRINGER, 2001).	28
FIGURA 7 - GRAMPOS SUBMETIDOS À ESFORÇOS DE FLEXÃO E CISALHANTES (CLOUTERRE, 1991).	29
FIGURA 8 - CARREGAMENTO PROGRESSIVO DO GRAMPO DURANTE O PROCESSO DE ESCAVAÇÃO (ADAPTADO DE CLOUTERRE, 1991).	30
FIGURA 9 - MECANISMOS DE INTERAÇÃO EM MACIÇOS REFORÇADOS (SIEIRA, 2003).	31
FIGURA 10 - SISTEMAS SOLO-GEOSINTÉTICO NO EQUIPAMENTO DE CISALHAMENTO DIRETO (SIEIRA, 2003).	32
FIGURA 11 - ENVOLTÓRIAS DE RESISTÊNCIA DA INTERFACE AREIA-GEOTÊXTIL EM ENSAIOS DE CISALHAMENTO DIRETO COM BASE RÍGIDA (BECKER, 2001).	33
FIGURA 12 – ENVOLTÓRIAS DE RESISTÊNCIA DA INTERFACE AREIA-GEOSINTÉTICO OBTIDA EM ENSAIOS DE CISALHAMENTO DIRETO SEM BASE RÍGIDA (BECKER, 2001).	33
FIGURA 13 – ENVOLTÓRIAS DE RESISTÊNCIA DA INTERFACE SOLO-GEOTÊXTIL NÃO TECIDO EM CONDIÇÃO: (A) NÃO SATURADA E (B) SUBMERSA (SERAPHIN E MELLO, 2003).	34
FIGURA 14 - PERFIS DOS PADRÕES DE RUGOSIDADE R1, R2 E R3 DOS MODELOS REDUZIDOS ESTACA-ROCHA (NUNES E CASTILHOS, 2002).	36
FIGURA 15 – MODO DE RUPTURA DOS MODELOS REDUZIDOS ESTACA-ROCHA DE FUSTE MUITO RUGOSO TIPO (NUNES E CASTILHOS, 2002).	37
FIGURA 16 - ESQUEMA DE ENSAIO DE ARRANCAMENTO EM MODELO REDUZIDO (ADAPTADO DE HAUSMANN E LEE, 1978).	38
FIGURA 17 - EQUIPAMENTO DE ENSAIO DE ARRANCAMENTO (SIEIRA, 2003).	39
FIGURA 18 - ENSAIO DE ARRANCAMENTO (ORTIGÃO E SAYÃO, 1999).	40
FIGURA 19 – DISTRIBUIÇÃO DAS DEFORMAÇÕES EM ENSAIO DE ARRANCAMENTO AO LONGO DO GRAMPO (CLOUTERRE, 1991).	42
FIGURA 20 – DISTRIBUIÇÃO DAS FORÇAS DE TRAÇÃO AO LONGO DO GRAMPO COM L=3M (CLOUTERRE, 1991).	42

FIGURA 21 – DISTRIBUIÇÃO DAS FORÇAS DE TRAÇÃO AO LONGO DO GRAMPO COM $L=12M$ (CLOUTERRE, 1991).	43
FIGURA 22 - MOBILIZAÇÃO DAS TENSÕES DE CISALHAMENTO NO GRAMPO COM $L=3M$ (CLOUTERRE, 1991).	43
FIGURA 23 - MOBILIZAÇÃO DAS TENSÕES DE CISALHAMENTO NO GRAMPO COM $L=12M$ (CLOUTERRE, 1991).	44
FIGURA 24 - CORRELAÇÃO ENTRE RESISTÊNCIA A O ARRANCAMENTO ( $Q_5$ ) E PRESSÃO LIMITE DO PRESSIÔMETRO MENÁRD ( $P_L$ ) PARA SOLOS ARENOSOS (ADAPTADO DE CLOUTERRE, 1991).	45
FIGURA 25 - CORRELAÇÃO ENTRE RESISTÊNCIA A O ARRANCAMENTO ( $Q_5$ ) E PRESSÃO LIMITE DO PRESSIÔMETRO MENÁRD ( $P_L$ ) PARA SOLOS ARGILOSOS (ADAPTADO DE CLOUTERRE, 1991).	45
FIGURA 26 - CORRELAÇÃO ENTRE A RESISTÊNCIA AO ARRANCAMENTO ( $Q_5$ ) E O NÚMERO DE GOLPES DO ENSAIO SPT (ADAPTADO DE ORTIGÃO, 1997).	46
FIGURA 27 - CORRELAÇÕES EMPÍRICAS ENTRE RESISTÊNCIA AO ARRANCAMENTO ( $Q_5$ ) E O NÚMERO DE GOLPES DO ENSAIO SPT (ORTIGÃO E SAYÃO, 1999).	47
FIGURA 28 - RESUMO COMPARATIVO DA RESISTÊNCIA AO ARRANCAMENTO DE GRAMPOS EM FUNÇÃO DA REINJEÇÃO (PITTA ET AL., 2003).	48
FIGURA 29 - ESQUEMA DOS COMPONENTES DOS GRAMPOS.	53
FIGURA 30 – DETALHE DA ESPUMA PARA GARANTIA DO TRECHO LIVRE E TUBO DE REINJEÇÃO.	54
FIGURA 31 - ESQUEMA DA INSTRUMENTAÇÃO DAS BARRAS.	54
FIGURA 32 – DETALHE DA INSTALAÇÃO DO <i>STRAIN GAGE</i> NA SEÇÃO USINADA: (A) FIOS DE LIGAÇÃO E CABO CENTRAL DE EMISSÃO DE SINAIS; (B) PROTEÇÃO COM COLA PLÁSTICA IMPERMEÁVEL.	55
FIGURA 33 - ESQUEMA DE FUNCIONAMENTO DO SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS DA INSTRUMENTAÇÃO.	57
FIGURA 34 - SISTEMA DOS ENSAIOS DE CALIBRAÇÃO DAS BARRAS.	58
FIGURA 35 – COMPORTAMENTO DE UM <i>STRAIN GAGE</i> DURANTE O ENSAIO DE CALIBRAÇÃO.	59
FIGURA 36 – CURVAS CARGA VERSUS DEFORMAÇÕES EXPERIMENTAIS MÉDIAS E CALCULADAS.	60
FIGURA 37 – LOCALIZAÇÃO DAS COTAS DOS GRAMPOS DE ENSAIOS DE ARRANCAMENTO NA ESCAVAÇÃO.	61
FIGURA 38 - MONTAGEM DO ENSAIO DE ARRANCAMENTO (ADAPTADO DE ORTIGÃO E SAYÃO, 1999).	62
FIGURA 39 – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE ARRANCAMENTO AR01: (A) GRAMPO INSTRUMENTADO; (B) GRAMPO NÃO INSTRUMENTADO.	64
FIGURA 40 - DISTRIBUIÇÃO DAS CARGAS AO LONGO DO GRAMPO INSTRUMENTADO DO ENSAIO AR01.	65
FIGURA 41 - RESULTADOS DOS ENSAIOS DE ARRANCAMENTO AR02: (A) GRAMPO INSTRUMENTADO; (B) GRAMPO NÃO INSTRUMENTADO.	66

FIGURA 42 - DISTRIBUIÇÃO DAS CARGAS AO LONGO DO GRAMPO INSTRUMENTADO DO ENSAIO AR02.	67
FIGURA 43 - RESULTADOS DOS ENSAIOS DE ARRANCAMENTO AR03: (A) GRAMPO INSTRUMENTADO; (B) GRAMPO NÃO INSTRUMENTADO.	68
FIGURA 44 - DISTRIBUIÇÃO DAS CARGAS AO LONGO DO GRAMPO INSTRUMENTADO DO ENSAIO AR03.	69
FIGURA 45 - RESULTADOS DOS ENSAIOS DE ARRANCAMENTO DA ETAPA AR04: (A) GRAMPO INSTRUMENTADO; (B) GRAMPO NÃO INSTRUMENTADO.	70
FIGURA 46 - DISTRIBUIÇÃO DAS CARGAS AO LONGO DO GRAMPO INSTRUMENTADO DO ENSAIO AR04.	71
FIGURA 47 - COLETA DAS AMOSTRAS INDEFORMADAS À FRENTE DOS FUROS DE ENSAIOS DE ARRANCAMENTO.	75
FIGURA 48 - CURVAS GRANULOMÉTRICAS DOS SOLOS B01, B02, B03 E B04.	76
FIGURA 49 - ENVOLTÓRIA DE RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DO SOLO B01.	80
FIGURA 50 - ENVOLTÓRIA DE RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DO SOLO B02.	80
FIGURA 51 - ENVOLTÓRIA DE RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DO SOLO B03.	81
FIGURA 52 - ENVOLTÓRIA DE RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DO SOLO B04.	81
FIGURA 53 - CORPO-DE-PROVA NO MOLDE PARA O FACEAMENTO DA METADE SUPERIOR.	83
FIGURA 54 - MOLDA GEM DOS CORPOS-DE-PROVA: (A) PREENCHIMENTO DO AMOSTRADOR COM NATA DE CIMENTO; (B) CONJUNTO ANTES DA FASE DE CURA.	83
FIGURA 55 - VISTA LATERAL DO CORPO-DE-PROVA DE INTERFACE SOLO/NATA DE CIMENTO.	84
FIGURA 56 - SIMULAÇÃO DA RUGOSIDADE NO CONTA TO SOLO/NATA DE CIMENTO.	85
FIGURA 57 COMPARAÇÃO DAS RUGOSIDADES: (A) GRAMPOS EXUMADOS EM CAMPO; (B) INTERFA CE SOLO/NATA DE CIMENTO NO LABORATÓRIO.	86
FIGURA 58 - CORPO-DE-PROVA DE INTERFACE SOLO/NATA TA DE CIMENTO APÓS O ENSAIO.	87
FIGURA 59 - DETALHE DE UM CORPO-DE-PROVA COM NATA DE CIMENTO NAS BORDAS.	87
FIGURA 60 - ENVOLTÓRIA DE RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DA INTERFACE SOLO/NATA DE CIMENTO - B01.	88
FIGURA 61 - ENVOLTÓRIA DE RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DA INTERFACE SOLO/NATA DE CIMENTO - B02.	89
FIGURA 62 - ENVOLTÓRIA DE RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DA INTERFACE SOLO/NATA DE CIMENTO - B03.	89
FIGURA 63 - ENVOLTÓRIA DE RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DA INTERFACE SOLO/NATA DE CIMENTO - B04.	90
FIGURA 64 - PERFIL DA ESCAVAÇÃO GRAMPEADA COM AS POSIÇÕES DE ARRANCAMENTO E AMOSTRAGEM.	93

FIGURA 65 - ENVOLTÓRIAS DE RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DO SOLO 1.	94
FIGURA 66 - ENVOLTÓRIAS DE RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DO SOLO 2.	94
FIGURA 67 - VARIAÇÃO DO COEFICIENTE DE INTERFACE EM FUNÇÃO DA TENSÃO NORMAL.	96
FIGURA 68 - CÍRCULO DE MOHR PARA DETERMINAÇÃO DAS TENSÕES NORMAIS AOS GRAMPOS.	98
FIGURA 69 - DISTRIBUIÇÃO DAS TENSÕES AO LONGO DO GRAMPO AR01.	99
FIGURA 70 - DISTRIBUIÇÃO DAS TENSÕES AO LONGO DO GRAMPO AR02.	100
FIGURA 71 - DISTRIBUIÇÃO DAS TENSÕES AO LONGO DO GRAMPO AR03.	100
FIGURA 72 - DISTRIBUIÇÃO DAS TENSÕES AO LONGO DO GRAMPO AR04.	101
FIGURA 73 - ESQUEMA DA DISTRIBUIÇÃO DA TENSÃO NORMAL AO LONGO DOS GRAMPOS.	102
FIGURA 74 - FATOR DE CARGA $\lambda_1$ EM FUNÇÃO DA TENSÃO NORMAL NOS GRAMPOS PARA O SOLO 2.	105
FIGURA 75 - FATOR DE CARGA $\lambda_1^*$ EM FUNÇÃO DA TENSÃO NOMINAL PARA SOLO RESIDUAL DE GNAISSE.	106
FIGURA 76 - FATOR DE CARGA ( $\lambda_1^*$ ) ESTIMADO PARA SOLOS RESIDUAIS DE GNAISSE	111
FIGURA 77 - FATOR DE CARGA ( $\lambda_2$ ) EM FUNÇÃO DA TENSÃO NORMAL ATUANTE NOS GRAMPOS.	113
FIGURA 78 - ZONA DE RIGIDEZ NO ENTORNO DO FURO RESULTANTE DA EXECUÇÃO DO GRAMPO.	114
FIGURA 79 - RESULTADOS DE ENSAIO DE CISALHAMENTO DIRETO EM SOLO NATURAL (BLOCO - B01).	128
FIGURA 80 - RESULTADOS DE ENSAIO DE CISALHAMENTO DIRETO EM SOLO SUBMERSO (BLOCO - B01).	129
FIGURA 81 - RESULTADOS DE ENSAIO DE CISALHAMENTO DIRETO EM SOLO NATURAL (BLOCO - B02).	130
FIGURA 82 - RESULTADOS DE ENSAIO DE CISALHAMENTO DIRETO EM SOLO SUBMERSO (BLOCO - B02).	131
FIGURA 83 - RESULTADOS DE ENSAIO DE CISALHAMENTO DIRETO EM SOLO NATURAL (BLOCO - B03).	132
FIGURA 84 - RESULTADOS DE ENSAIO DE CISALHAMENTO DIRETO EM SOLO SUBMERSO (BLOCO - B03).	133
FIGURA 85 - RESULTADOS DE ENSAIO DE CISALHAMENTO DIRETO EM SOLO NATURAL (BLOCO - B04).	134
FIGURA 86 - RESULTADOS DE ENSAIO DE CISALHAMENTO DIRETO EM SOLO SUBMERSO (BLOCO - B04).	135
FIGURA 87 - RESULTADOS DE ENSAIO DE CISALHAMENTO DIRETO DA INTERFACE SOLO/NATA DE CIMENTO NATURAL (BLOCO - B01).	137
FIGURA 88 - RESULTADOS DE ENSAIO DE CISALHAMENTO DIRETO DA INTERFACE	

SOLO/NATA DE CIMENTO SUBMERSA (BLOCO - B01).	138
FIGURA 89 – RESULTADOS DE ENSAIO DE CISALHAMENTO DIRETO DA INTERFACE SOLO/NATA DE CIMENTO NATURAL (BLOCO - B02).	139
FIGURA 90 – RESULTADOS DE ENSAIO DE CISALHAMENTO DIRETO DA INTERFACE SOLO/NATA DE CIMENTO SUBMERSA (BLOCO - B02).	140
FIGURA 91– RESULTADOS DE ENSAIO DE CISALHAMENTO DIRETO DA INTERFACE SOLO/NATA DE CIMENTO NATURAL (BLOCO - B03).	141
FIGURA 92 – RESULTADOS DE ENSAIO DE CISALHAMENTO DIRETO DA INTERFACE SOLO/NATA DE CIMENTO SUBMERSA (BLOCO - B03).	142
FIGURA 93 – RESULTADOS DE ENSAIO DE CISALHAMENTO DIRETO DA INTERFACE SOLO/NATA DE CIMENTO NATURAL (BLOCO - B04).	143
FIGURA 94 – RESULTADOS DE ENSAIO DE CISALHAMENTO DIRETO DA INTERFACE SOLO/NATA DE CIMENTO SUBMERSA (BLOCO - B04).	144

## Lista de Tabelas

TABELA 1 – TENSÕES DE RUPTURA NA INTERFACE SOLO-AÇO (GUILLOUX ET AL., 1979).	34
TABELA 2 - ÂNGULOS DE ATRITO EM FUNÇÃO DA RUGOSIDADE DA INTERFACE (INGOLD E TEMPLEMAN, 1979).	35
TABELA 3 – RESULTADOS DAS PROVAS DE CARGA DOS MODELOS REDUZIDOS ESTACA-ROCHA BRANDA (NUNES E CASTILHOS, 2002).	37
TABELA 4 – VALORES DE RESISTÊNCIA AO ARRANCAMENTO.	49
TABELA 5 – CARACTERIZAÇÃO DAS DESCONTINUIDADES DO MACIÇO.	51
TABELA 6 – RESULTADOS DOS ENSAIOS SPT.	52
TABELA 7 – RESUMO DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS DE ARRANCAMENTO.	72
TABELA 8 - VALORES REPRESENTATIVOS DE ATRITO LATERAL.	73
TABELA 9 – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO.	76
TABELA 10 - CARACTERÍSTICAS DOS CORPOS-DE-PROVA DOS ENSAIOS DE CISLHAMENTO DIRETO EM SOLO.	78
TABELA 11 - PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA DOS SOLOS	82
TABELA 12 - RESISTÊNCIA À TRAÇÃO E À COMPRESSÃO UNIAXIAL DA NATA DE CIMENTO	84
TABELA 13 – PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA DA INTERFACE SOLO/NATA DE CIMENTO	90
TABELA 14 - PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA DOS SOLOS 1 E 2.	95
TABELA 15 – VALORES DA TENSÕES NOS GRAMPOS DE ARRANCAMENTO.	98
TABELA 16 – TENSÃO NORMAL TUANTE NOS GRAMPOS.	102
TABELA 17 – RESUMO DOS RESULTADOS DE ENSAIOS DE LABORATÓRIO E CAMPO.	104
TABELA 18 - FATORES DE CARGA $\lambda_1$ PARA OS SOLOS 1 E 2.	105
TABELA 19 – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE ARRANCAMENTO DE SPRINGER (2005).	107
TABELA 20 – ESTIMATIVA DA RESISTÊNCIA AO ARRANCAMENTO DOS GRAMPOS DE SPRINGER (2005).	108
TABELA 21 – RESULTADOS DE ENSAIOS DE ARRANCAMENTO DE MAGALHÃES (2005).	108
TABELA 22 - ESTIMATIVA DA RESISTÊNCIA A O ARRANCAMENTO DO GRAMPO DE MAGALHÃES (2005)	109
TABELA 23 – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE ARRANCAMENTO DE FEIJÓ E EHRLICH (2001).	109
TABELA 24 ESTIMATIVA DA RESISTÊNCIA AO ARRANCAMENTO DOS GRAMPOS DE FEIJÓ E EHRLICH (2001).	110
TABELA 25 – ESTIMATIVA DO FATOR DE CARGA $\lambda_2$ PARA OS SOLOS 1 E 2.	113

## Lista de Símbolos e Siglas

A/C	Fator água/cimento
AR	Etapa de ensaio de arrancamento
B	Bainha do grampo
B (n)	Identificação dos blocos de amostras indeformadas
$c'$	Parâmetro de resistência de Mohr-Coulomb: Coesão efetiva
CA	Teor de Carbono
$c_a$	Adesão solo-reforço
$c_a'$	Adesão efetiva da interface solo-reforço
$c_c$	Coefficiente de curvatura
CL	Argila de baixa plasticidade
$c'_{nat}$	Coesão efetiva para o solo na umidade natural
CP	Corpo de prova
$c'_{sub}$	Coesão efetiva para o solo submerso
$C_u$	Coefficiente de não uniformidade
e	Índice de vazios
F	Força aplicada
f	Coefficiente de atrito solo-reforço
F (n)	Família de fraturas
FS	Fator de sensibilidade
G	Densidade real dos grãos
IP	Índice de Plasticidade
L	Comprimento da barra ou grampo
$L_a$	Comprimento injetado do grampo
LL	Limite de liquidez
$l_o$	Deslocamento horizontal de grampos
LP	Limite de plasticidade
M	Momento fletor atuante no grampo
$M_{max}$	Momento fletor máximo atuante no grampo
NE	Direção nordeste
(n)f	Numero de fases de injeção
NR	Não referenciado
NW	Direção noroeste
$P_l$	Pressão limite (ensaio pressiométrico)
$q_b$	Resistência ao arrancamento
$q_b^*$	Resistência ao arrancamento estimada
R	Resistência nominal
R1	Grau de rugosidade elevado
R2	Grau de rugosidade médio
R3	Grau de rugosidade reduzido
S	Grau de saturação
$S_i$	Grau de saturação inicial
SC	Areia argilosa
SE	Direção sudeste
SG	Strain gage
SW	Direção sudoeste
$T_{max}$	Força máxima de tração mobilizada no grampo
$T_n$	Carga máxima aplicada ao grampo
$T_r$	Carga de ruptura do grampo
$T_o$	Força inicial de tração mobilizada no grampo
$(u_g - u_w)_r$	Sucção mátrica na ruptura
V	Volts



$w$	Teor de umidade
$w_f$	Teor de umidade final
$w_o$	Teor de umidade inicial
$y_o$	Deslocamento vertical de grampos
$(\sigma_n - C_u)_t$	Estado de tensão normal de ruptura
$\Delta L$	Variação de leitura dos strain gages devido ao carregamento
$\Delta R$	Variação da resistência
$\alpha$	Coefficiente de interface solo/nata de cimento
$\delta$	Ângulo de atrito solo-reforço
$\delta_h$	Deslocamento horizontal
$\delta_v$	Deslocamento vertical
$\epsilon$	Deformação específica
$\epsilon_1$	Deformação principal
$\phi'$	Parâmetro de resistência de Mohr-Coulomb: ângulo de atrito efetivo
$\phi^b$	Ângulo de incremento de resistência cisalhante relativo à sucção
$\phi_{\text{turo}}$	Diâmetro da perfuração do grampo
$\gamma_d$	Peso específico seco inicial
$\gamma_{\text{nat}}$	Peso específico natural do solo
$\lambda$	Coefficiente de aderência solo-reforço
$\lambda_1$	Fator de carga
$\lambda_1^*$	Fator de carga para solo residual de gnaisse
$\lambda_2$	Fator de carga para solos residuais não saturados
$\sigma_1$	Tensão principal maior
$\sigma_3$	Tensão principal menor
$\sigma_c$	Resistência à compressão
$\sigma_n$	Tensão normal
$\sigma_n$	Tensão normal aplicada no plano vertical
$\sigma_t$	Resistência à tração
$\sigma_v$	Tensão normal aplicada no plano horizontal
$\tau$	Tensão cisalhante
$\tau_{hv}$	Tensão cisalhante no plano horizontal
$\tau_{\text{int}}$	Tensão de cisalhamento no plano de ruptura
ABMS	Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
ABEF	Associação Brasileira de Estruturas de Fundações
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASCE	American Society of Civil Engineering
COPPE	Coordenação do Programas de Pós-Graduação em Engenharia da UFRJ
CPRM	Centro de Pesquisa de Recursos Minerais
FEUP	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
ICE	International Committee of Engineering
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
ISRM	International Society of Rock Mechanics
ISSMFE	International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering
N(SPT)	Número de golpes do ensaio SPT
NATM	New Austrian Tunneling Method
NBR	Norma Brasileira
PUC-Rio	Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

PVC	Policloreto de Vinila
SPT	Standard Penetration Test
SUCS	Sistema unificado de classificação de solos
UDESC	Universidade do Estado de Santa Catarina
UERJ	Universidade do Estado do Rio de Janeiro
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro
UnB	Universidade de Brasília