



André Pereira Lima

**Comportamento de uma escavação grampeada
em solo residual de gnaiss**

Tese de Doutorado

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação
em Engenharia Civil como requisito parcial para
obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Alberto S. F. J. Sayão

Co-orientadora: Prof^ª Anna Laura L. S. Nunes

Rio de Janeiro

Abril de 2007



André Pereira Lima

**Comportamento de uma escavação grampeada
em solo residual de gnaiss**

Tese de Doutorado

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio. Área de Concentração: Geotecnia. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Alberto Sampaio Ferraz Jardim Sayão

Orientador, Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Prof^a Anna Laura Lopes da Silva Nunes

Co-orientadora, COPPE/UFRJ

Dr. Leandro de Moura Costa Filho

LPS Consultoria e Engenharia Ltda.

Prof. Waldemar Coelho Hachich

Escola Politécnica da USP

Prof. Pedricto Rocha Filho

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Prof. Sérgio Augusto Barreto da Fontoura

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Prof. José Eugênio Leal

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 17 de Abril de 2007

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

André Pereira Lima

Graduou-se em Engenharia Civil, pela Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), em 1999. Participou como engenheiro geotécnico em diversos projetos entre 1999 e 2007. Concluiu o Mestrado em Engenharia Civil (Geotecnia) na PUC-Rio (2002), desenvolvendo pesquisa sobre modelagem numérica de escavações grampeadas. Publicou trabalhos em congressos no Brasil e no exterior, participando de eventos nacionais e internacionais relacionados à Mecânica dos Solos. Ingressou no curso de Doutorado em Engenharia Civil (Geotecnia) em 2002, atuando na área de Geotecnia Experimental e Geomecânica Computacional. Atualmente é professor de Mecânica dos Solos I e II no curso de Engenharia Civil da Universidade Veiga de Almeida (UVA).

Ficha Catalográfica

Lima, André Pereira

Comportamento de uma escavação grampeada em solo residual de gnaiss / André Pereira Lima; orientador: Alberto S. F. J. Sayão; co-orientadora: Anna Laura L. S. Nunes. – 2007.

v., 431f. : il. ; 30 cm

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

Inclui bibliografia.

1. Engenharia Civil – Teses. 2. Solo grampeado. 3. Escavação. 4. Instrumentação. 5. Solo residual. 6. Mecânica dos solos. 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

Dedico esta tese
aos meus pais, Sílio e Odete,
a minha noiva Michele e
a minha irmã Martha.

Agradecimentos

Aos meus orientadores professor Alberto S. F. J. Sayão e professora Anna Laura N. S. Nunes pela confiança depositada em mim. Meus sinceros agradecimentos ao apoio nas horas difíceis, às contribuições durante a pesquisa e, principalmente, pela amizade, respeito e orientação recebida.

À empresa SEEL Engenharia Ltda. por sua brilhante iniciativa de parceria com a universidade, que possibilitou o desenvolvimento desta pesquisa. Em particular, meus agradecimentos ao Eng. Paulo Henrique pelo incentivo, críticas e sugestões no decorrer deste trabalho. Agradeço também a todos os funcionários da obra pelo apoio fundamental nas etapas do monitoramento, em especial aos engenheiros Luiz Eduardo, Eduardo França e Fernando Medina, e ao mestre de obras Edinho.

A todos os professores do Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio, pela agradável convivência e pelos conceitos transmitidos ao longo de todo o curso de doutorado.

À professora Denise M. S. Gerscovich (UERJ) pelas contribuições na fase inicial da pesquisa.

Ao professor Tácio Mauro P. de Campos (PUC-Rio) e ao Eng. William Braga pelo apoio na campanha de ensaios de laboratório.

Ao Dr. Leandro de Moura Costa Filho (LPS Engenharia Ltda.) pelas discussões acerca da Mecânica dos Solos.

Ao geólogo Alex Gomes (COPPE/UFRJ) pela descrição da geologia local. Seus mapas e modelos geológicos-geotécnicos foram indispensáveis às análises realizadas.

À Eng^a Fernanda O. Springer (PUC-Rio) pela sua colaboração na fase de instrumentação.

Ao amigo e doutorando Alexandre Saré que foi parceiro em todas as etapas deste trabalho. Obrigado pelo seu apoio no campo.

Aos colegas da PUC-Rio pela convivência harmoniosa. Em especial, agradeço a Tiago, Bernadete, Mônica e Taíse pela ajuda durante a campanha experimental.

A todos os funcionários do DEC, em particular Rita, Fátima, Cristiano, Lenilson, José Raimundo, Amaury e Josué.

Ao CNPq pela ajuda financeira indispensável ao desenvolvimento deste trabalho.

À minha querida noiva Michele por seu apoio em todos os momentos difíceis e por ter compreendido a minha ausência durante o desenvolvimento desta pesquisa. Seu amor foi força vital nesta longa jornada.

Aos meus amados pais, pessoas maravilhosas que contribuíram para esta difícil conquista. Meus agradecimentos por todo o amor recebido destas duas pessoas que sempre me confortaram nestes anos de dedicação à tese. Obrigado por tudo!

À minha maravilhosa família, em especial à minha irmã Martha.

A Deus, por sua luz ao longo de toda a minha vida.

Resumo

Lima, André Pereira; Sayão, Alberto de Sampaio Ferraz Jardim; Nunes, Anna Laura Lopes da Silva. **Comportamento de uma escavação grampeada em solo residual de gnaiss**. Rio de Janeiro, 2007. 431p. Tese de Doutorado - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O comportamento de uma escavação grampeada em solo residual de gnaiss foi avaliado por um programa de monitoramento geotécnico do maciço reforçado. Diversas obras estão sendo realizadas no país, sem conhecimentos detalhados sobre as deformações inerentes à técnica e sobre os mecanismos de interação solo-grampo. No Brasil, menos de 10% das obras de solo grampeado utilizaram algum tipo de instrumentação. Esta pesquisa teve por objetivo a análise de uma escavação em solo residual reforçada com grampos. A escavação foi instrumentada para o monitoramento dos deslocamentos do maciço e dos esforços nos grampos. Um extenso programa experimental de ensaios de campo e laboratório foi executado para fornecer os parâmetros geotécnicos utilizados nas análises computacionais. A escavação grampeada teve cerca de 40m de altura, constituindo uma experiência inédita no país e talvez no mundo. Devido a esta altura, os grampos superiores foram instalados com comprimentos de até 24m. O comportamento do talude foi influenciado pelo processo executivo e por uma outra escavação no terreno vizinho. O monitoramento indicou que os deslocamentos do maciço e os esforços nos grampos cresceram significativamente com o avanço da escavação e não cessaram ao final da obra. Os grampos trabalharam predominantemente à tração, com momentos fletores pouco significativos. Os valores de tração estimados na fase de projeto diferiram dos resultados obtidos na instrumentação. A distribuição dos esforços de tração foi influenciada pelas características geológicas do maciço. A tração máxima ($T_{máx}$) teve uma posição variando com a profundidade e a inclinação do talude, e uma magnitude aumentando exponencialmente com o avanço da escavação. A tração na face (T_o) foi de 0,3 a 0,6 de $T_{máx}$. A resistência mobilizada no contacto solo-grampo não ultrapassou 35% do valor de q_s medido nos ensaios de campo.

Palavras-chave

Solo Grampeado; Escavação; Instrumentação; Solo Residual.

Abstract

Lima, André Pereira; Sayão, Alberto de Sampaio Ferraz Jardim (Advisor); Nunes, Anna Laura Lopes da Silva (Advisor). **Behaviour of a nailed excavation in gneissic residual soil**. Rio de Janeiro, 2007. 431p. Doctoral Thesis - Civil Engineering Department, Catholic University of Rio de Janeiro.

The behavior of a nailed excavation in gneissic residual soil has been studied by a comprehensive research program, including instrumentation, field and laboratory tests and numerical analyses. Soil nailing is becoming a popular stabilization technique in Brazil. However, a solid knowledge about the soil-nail interaction is still lacking. There are a few studies about the inherent deformations of the reinforced mass and the magnitude of nail's stresses. In Brazil, less than 10% of stabilization works have some type of instrumentation. The main objective of this research was monitoring and analysing a 40m high soil nailed slope excavation.

Due to this unique height, the upper nails were installed with 24m length. The slope behavior was influenced by several factors, such as the construction technique and a subsequent excavation at one adjacent site. The results indicated a significant increase of reinforced mass displacements and of the nail's mobilized tension during the progress of the excavation. These did not cease after the end of the excavation, due to the adjacent work. During and after construction, the nails worked predominantly in tension. Estimated tension loads in the project phase were compared with the instrumentation's results. The stress distribution was influenced by local geology. The maximum axial force ($T_{\text{máx}}$) increased exponentially with the progress of the excavation and its position, in each nail, varies with the slope's depth and inclination. The magnitude of the axial load in the excavation face is observed to be between 0,3 and 0,6 of $T_{\text{máx}}$. The mobilization of the reinforcement elements was smaller than 35% q_s .

Keywords

Soil Nailing; Excavation; Instrumentation; Residual Soil.

Sumário

| | |
|---|-----------|
| 1.Introdução | 32 |
| 2.Solo Grampeado: definições, desenvolvimento e aplicações | 34 |
| 2.1.Histórico e desenvolvimento | 34 |
| 2.1.1.Origens do solo grampeado | 34 |
| 2.1.2.Definição da técnica | 35 |
| 2.1.3.Critérios de aplicação | 37 |
| 2.1.4.Metodologia executiva, equipamentos e materiais de construção | 38 |
| 2.1.5.Aplicação da técnica no exterior | 54 |
| 2.1.6.Aplicação da técnica no Brasil | 56 |
| 2.1.7.Vantagens e limitações do solo grampeado | 67 |
| 2.1.8.Comparação com outros sistemas de estabilização | 71 |
| 2.1.9.Durabilidade de estruturas grampeadas | 75 |
| 3.Solo Grampeado: ensaios, mecanismos e monitoramento | 77 |
| 3.1.Ensaio de arrancamento | 77 |
| 3.1.1.Conceitos | 77 |
| 3.1.2.Descrição do ensaio | 79 |
| 3.1.3.Resultados típicos e estimativas de q_s | 80 |
| 3.1.4.Correlações empíricas a partir de valores de q_s | 86 |
| 3.2.Mecanismos e comportamento de taludes grampeados | 91 |
| 3.2.1.Interação solo / grampo | 92 |
| 3.2.2.Mobilização da resistência ao cisalhamento ao longo do grampo | 94 |
| 3.2.3.Distribuição de tensão nos grampos e no solo reforçado | 95 |
| 3.2.4.Estado de tensões no maciço de solo grampeado | 101 |
| 3.2.5.Mobilização da resistência à flexão dos grampos | 102 |

| | | |
|--------|---|-----|
| 3.2.6. | <i>Deformações e deslocamentos na face do solo grampeado</i> | 103 |
| 3.2.7. | <i>Influência da face na estabilidade</i> | 106 |
| 3.3. | Dimensionamento de taludes grampeados | 107 |
| 3.3.1. | <i>Tipos de ruptura de taludes em solo grampeado</i> | 107 |
| 3.3.2. | <i>Parâmetros preliminares</i> | 109 |
| 3.3.3. | <i>Métodos de dimensionamento</i> | 114 |
| 3.3.4. | <i>Comparação entre métodos</i> | 124 |
| 3.3.5. | <i>Análises tensão-deformação</i> | 124 |
| 3.3.6. | <i>Considerações especiais de projeto</i> | 126 |
| 3.4. | Obras de solo grampeado instrumentadas | 127 |
| 3.4.1. | <i>Parâmetros a serem monitorados</i> | 127 |
| 3.4.2. | <i>Instrumentos típicos de monitoramento de taludes grampeados</i> | 128 |
| 3.4.3. | <i>Métodos de monitoramento</i> | 139 |
| 3.4.4. | <i>Casos históricos de taludes instrumentados</i> | 140 |
| 4. | Descrição de uma escavação grampeada em solo residual de gnaisse | 151 |
| 4.1. | Introdução | 151 |
| 4.2. | Geologia local | 152 |
| 4.3. | Concepção do projeto | 160 |
| 4.4. | Descrição da obra | 165 |
| 5. | Investigação geotécnica | 180 |
| 5.1. | Introdução | 180 |
| 5.2. | Programa experimental | 180 |
| 5.2.1. | <i>Programação geral</i> | 180 |
| 5.2.2. | <i>Densidade dos grãos</i> | 183 |
| 5.2.3. | <i>Caracterização geotécnica e classificação do material</i> | 184 |
| 5.2.4. | <i>Curva característica</i> | 190 |
| 5.2.5. | <i>Compressão confinada</i> | 194 |

| | |
|---|------------|
| 5.2.6. Cisalhamento direto | 201 |
| 5.2.7. Ensaio triaxial | 207 |
| 5.3. Monitoramento geotécnico da obra | 234 |
| 5.3.1. Inclínômetros | 237 |
| 5.3.2. "Tell tales" | 242 |
| 5.3.3. "Strain-gauges" | 244 |
| 6. Estudo do comportamento de uma escavação grampeada em solo residual de gnaise | 258 |
| 6.1. Análises adicionais em Equilíbrio Limite | 258 |
| 6.2. Resultados da instrumentação e monitoramento | 265 |
| 6.2.1. Deslocamentos horizontais no talude fornecidos pelos inclinômetros | 265 |
| 6.2.2. Deslocamentos horizontais no talude grampeado fornecidos pelos "tell tales" | 275 |
| 6.2.3. Esforços de tração nos grampos | 278 |
| 6.2.4. Momentos fletores nos grampos | 280 |
| 6.3. Análises das deformações na escavação grampeada e das solicitações nos grampos | 283 |
| 6.3.1. Avaliação dos deslocamentos durante a escavação e após o grampeamento do solo | 284 |
| 6.3.2. Avaliação das solicitações nos grampos durante a construção e em serviço | 295 |
| 6.3.3. Distribuição das tensões nos grampos e ponto de tração máxima | 300 |
| 6.3.4. Magnitude das forças de tração máxima nos grampos | 304 |
| 6.3.5. Comparação dos valores de tração medidos com os estimados na fase de projeto | 307 |
| 6.3.6. Tração na face | 311 |
| 6.3.7. Estado de tensões no maciço grampeado | 313 |
| 6.3.8. Influência de alguns aspectos executivos | 316 |
| 7. Conclusões e recomendações | 330 |
| 7.1. Ensaio de laboratório | 330 |
| 7.2. Desempenho da instrumentação e monitoramento geotécnico | 333 |

| | |
|---|------------|
| 7.3.Considerações sobre a escavação grampeada em solo residual de gnaissse _____ | 334 |
| 7.4.Sugestões _____ | 339 |
| 8.Referências bibliográficas _____ | 340 |
| Apêndice 01: Resultados do programa experimental _____ | 366 |
| Apêndice 02: Determinação dos parâmetros de deformabilidade em ensaios triaxiais _____ | 390 |
| Apêndice 03: Resultados do monitoramento geotécnico com "tell tales" _____ | 392 |
| Apêndice 04: Resultados do monitoramento geotécnico com "strain-gauges" _ | 398 |
| Apêndice 05: Desempenho dos grampos instrumentados à flexão _____ | 417 |

Lista de figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1. Técnicas de execução de túneis com revestimento rígido e flexível | 35 |
| Figura 2. Aplicações de sistemas de reforço de solo | 36 |
| Figura 3. Aplicações usuais de solo grampeado | 38 |
| Figura 4. Construção de estrutura em solo grampeado em escavações com equipamentos mecânicos | 39 |
| Figura 5. Principais etapas construtivas em escavações grampeadas | 39 |
| Figura 6. Escavações em bancadas | 41 |
| Figura 7. Tipos de cabeça dos grampos | 42 |
| Figura 8. Processo Titan (Dywidag) de instalação do reforço | 46 |
| Figura 9. Grampos aparafusados | 47 |
| Figura 10. Revestimento da parede de solo grampeado | 48 |
| Figura 11. Suporte circular usando a técnica de solo grampeado | 49 |
| Figura 12. Placas pré-moldadas em talude de solo residual | 49 |
| Figura 13. Resistência à compressão simples do concreto projetado | 50 |
| Figura 14. Drenos subhorizontais profundos | 51 |
| Figura 15. Drenagem superficial com barbacã | 52 |
| Figura 16. Drenagem superficial com dreno do paramento | 52 |
| Figura 17. Canaletas de crista em estruturas de solo grampeado | 53 |
| Figura 18. Primeira estrutura em solo grampeado na França | 54 |
| Figura 19. Estruturas grampeadas na França | 55 |
| Figura 20. Contenção de taludes de emboques em 1970 | 57 |
| Figura 21. Escavação estabilizada com grampos e tirantes em Niterói - RJ | 58 |
| Figura 22. Talude grampeado sob a fundação de viaduto ferroviário | 58 |
| Figura 23. Muro experimental no Morro da Formiga | 59 |
| Figura 24. Talude grampeado, Av. Automóvel Clube | 59 |
| Figura 25. Solo grampeado, Linha Amarela - RJ | 60 |
| Figura 26. Solo grampeado em Niterói - RJ | 62 |
| Figura 27. Classificação em ordem crescente de custos das estruturas de contenção estudadas | 68 |
| Figura 28. Comparação entre solo-grampeado e estaca-raíz | 71 |

| | |
|--|-----|
| Figura 29. Deslocamentos horizontais máximos em estruturas de solo grampeado e terra armada _____ | 72 |
| Figura 30. Mecanismos de transferência de carga _____ | 74 |
| Figura 31. Estruturas mistas _____ | 75 |
| Figura 32. Ensaio de arrancamento _____ | 78 |
| Figura 33. Correlações empíricas para q_s em areias _____ | 86 |
| Figura 34. Correlações empíricas para q_s em argilas e siltes _____ | 87 |
| Figura 35. Correlação entre q_s e p_1 para solos arenosos _____ | 87 |
| Figura 36. Correlação entre q_s e p_1 para solos argilosos _____ | 88 |
| Figura 37. Correlações empíricas para q_s _____ | 88 |
| Figura 38. Correlações entre q_s e número de golpes N(SPT) para solo residual de gnaiss _____ | 90 |
| Figura 39. Grampos submetidos à flexão e esforços cisalhantes _____ | 93 |
| Figura 40. Modelagem da curva experimental do ensaio de arrancamento pela lei de Fran e Zhao _____ | 94 |
| Figura 41. Mobilização da resistência ao cisalhamento ao longo do grampo _____ | 95 |
| Figura 42. Distribuição de tensões e deslocamentos em taludes grampeados _____ | 96 |
| Figura 43. Esforços axiais na cabeça de um grampo durante as sucessivas fases de escavação _____ | 97 |
| Figura 44. Definição das zonas ativa e passiva em escavações com grampos livres _____ | 98 |
| Figura 45. Definição de uma possível superfície de ruptura _____ | 98 |
| Figura 46. Distribuição simplificada dos esforços axiais nos grampos _____ | 99 |
| Figura 47. Força axial máxima normalizada em 11 obras _____ | 100 |
| Figura 48. Estado de tensões no solo grampeado _____ | 102 |
| Figura 49. Esquema das deformações em taludes grampeados _____ | 104 |
| Figura 50. Deslocamentos na face de muros instrumentados _____ | 105 |
| Figura 51. Variação dos deslocamentos na face de muros instrumentados _____ | 105 |
| Figura 52. Mecanismos de ruptura no estado limite último _____ | 107 |
| Figura 53. Ruptura devido à altura elevada nas etapas de escavação em areia de "Fontainebleau" com $\phi=38^\circ$ e $c=4\text{kPa}$ _____ | 109 |
| Figura 54. Otimização de comprimento dos grampos _____ | 110 |
| Figura 55. Modelo de análise dos parâmetros de solo grampeado _____ | 111 |

| | |
|--|-----|
| Figura 56. Parâmetros de projetos de taludes grampeados em solos residuais brasileiros _____ | 112 |
| Figura 57. Influência da rigidez dos grampos no reforço _____ | 118 |
| Figura 58. Modos de instabilização externa _____ | 122 |
| Figura 59. Medidor de nível d'água _____ | 129 |
| Figura 60. Piezômetro Casagrande _____ | 130 |
| Figura 61. Configuração com 3 "tell tales" (GCO, 1979). _____ | 131 |
| Figura 62. Etapas de instalação do tubo de acesso (Ortigão e Sayão, 2000). _____ | 132 |
| Figura 63. Indicação das leituras do inclinômetro. _____ | 133 |
| Figura 64. Princípio de funcionamento do inclinômetro _____ | 133 |
| Figura 65. Equipamento de inclinômetro tipo "Digitilt" _____ | 134 |
| Figura 66. Tipos de "strain-gauges" _____ | 138 |
| Figura 67. Esquema da instrumentação _____ | 140 |
| Figura 68. Escavação experimental em solo grampeado _____ | 142 |
| Figura 69. Geometria do talude _____ | 142 |
| Figura 70. Seção típica instrumentada _____ | 143 |
| Figura 71. Seção instrumentada _____ | 144 |
| Figura 72. Obra instrumentada na Inglaterra _____ | 145 |
| Figura 73. Força axial em cada "strain-gauge" vs. tempo _____ | 146 |
| Figura 74. Obra experimental instrumentada no RJ _____ | 148 |
| Figura 75. Detalhes da obra experimental em solo grampeado _____ | 150 |
| Figura 76. Localização das obras "Museu 0", "Museu 1" e "Museu 2" _____ | 152 |
| Figura 77. Localização da obra "Museu 1" _____ | 152 |
| Figura 78. Mapa geológico-estrutural da área das obras "Museu 1" e "Museu 2" _____ | 154 |
| Figura 79. Vista geral da área das obras "Museu 1" e "Museu 2" em foto aérea na escala 1:8.000 _____ | 155 |
| Figura 80. Detalhe do talude em 11/12/2003 _____ | 156 |
| Figura 81. Localização dos perfis transversais das obras "Museu 1" e "Museu 2" _____ | 158 |
| Figura 82. Perfil geológico-geotécnico M1-M1' da obra "Museu 1" _____ | 159 |
| Figura 83. Levantamento topográfico da obra "Museu 1" _____ | 160 |
| Figura 84. Seção-tipo de projeto (seção 03) _____ | 161 |

| | |
|---|-----|
| Figura 85. Avaliação preliminar do total de reforços por seção_____ | 163 |
| Figura 86. Seção-tipo da solução de estabilização recomendada _____ | 164 |
| Figura 87. Variação do fator de segurança em função do atrito unitário solo-grampo (q_s) _____ | 165 |
| Figura 88. Concepção do projeto _____ | 166 |
| Figura 89. Vista do talude grampeado (FACES A, B, C, D e E) _____ | 167 |
| Figura 90. Vista do talude grampeado (FACES F, G e H)_____ | 168 |
| Figura 91. Vista geral das etapas construtivas _____ | 169 |
| Figura 92. Histograma da altura da escavação em função da data da escavação das seções instrumentadas A e B _____ | 170 |
| Figura 93. Processo de escavação - Face C _____ | 171 |
| Figura 94. Processo de escavação - Face G _____ | 172 |
| Figura 95. Seqüência da perfuração para colocação dos grampos - Face C _ | 173 |
| Figura 96. Seqüência da perfuração para colocação dos grampos - Face G _ | 174 |
| Figura 97. Tempo médio de perfuração dos grampos_____ | 174 |
| Figura 98. Seqüência do processo de injeção dos grampos - Face C _____ | 175 |
| Figura 99. Seqüência do processo de injeção dos grampos - Face G _____ | 176 |
| Figura 100. Tempo médio de injeção dos grampos _____ | 176 |
| Figura 101 Seqüência da aplicação da “pressão de incorporação” nos grampos da Face G. _____ | 177 |
| Figura 102. Fases da obra_____ | 179 |
| Figura 103. Processo de obtenção das amostras indeformadas _____ | 182 |
| Figura 104. Modelo geológico-geotécnico 3D da face C – “Museu 1”_____ | 186 |
| Figura 105. Perfis geológico-geotécnicos longitudinais das colunas A e B, face C – “Museu 1” _____ | 187 |
| Figura 106. Modelo geológico-geotécnico 3D da face G – “Museu 1” _____ | 188 |
| Figura 107. Perfis geológico-geotécnicos longitudinais das colunas A e B, face G – “Museu 1” _____ | 189 |
| Figura 108. Variação de ϕ^b / ϕ' com o nível de sucção em ensaios de cisalhamento direto _____ | 190 |
| Figura 109. Curva Características_____ | 193 |
| Figura 110. Corpos de prova dos ensaios de compressão confinada_____ | 194 |
| Figura 111. Curva e $x \log \sigma'_v$ - Bloco B2M (solo residual maduro) _____ | 199 |

| | |
|--|-----|
| Figura 112. Curva e $x \log \sigma'_v$ - Bloco B6M (solo residual jovem) | 199 |
| Figura 113. Prensa de deformação controlada utilizada pelo laboratório de geotecnia da PUC-Rio | 202 |
| Figura 114. Corpos de prova moldados para os ensaios de cisalhamento direto | 203 |
| Figura 115. Envoltória de resistência ao cisalhamento do solo residual maduro (Bloco B2M) | 205 |
| Figura 116. Efeito da direção do bandeamento na envoltória de resistência ao cisalhamento (solo residual jovem - Bloco B5M) | 206 |
| Figura 117. Envoltória de resistência ao cisalhamento do solo residual jovem (Bloco B5M) | 207 |
| Figura 118. Corpos de prova ($\phi=1\frac{1}{2}$ " para os ensaios triaxiais | 208 |
| Figura 119. Prensa triaxial de deformação controlada utilizada pelo laboratório de geotecnia da PUC-Rio | 210 |
| Figura 120. Trajetórias de tensões - Ensaio E1 a E4 (Bloco B2M) | 214 |
| Figura 121. Trajetórias de tensões - Ensaio E1-E2 e E5-E6-E7 (Bloco B6M) | 217 |
| Figura 122. Trajetórias de tensões - Ensaios E3-E4 e E5-E6-E7 (Bloco B6M) | 219 |
| Figura 123. Trajetórias de tensões - Ensaio E8-E9-E10 (Bloco B6M) | 221 |
| Figura 124. Prensa triaxial de tensão controlada | 222 |
| Figura 125. Trajetórias de tensões seguidas - Ensaio E1-E2-E3 e E4-E5-E6 (Bloco B3MS) | 224 |
| Figura 126. Trajetórias de tensões seguidas - Ensaio E1-E2-E3 e E4-E5-E6 (Bloco B6MS) | 226 |
| Figura 127. Comparação entre os módulos de deformabilidade E_{50} para os ensaios CID e CID-E (corpos de prova saturados) | 230 |
| Figura 128. Envoltória transformada - ensaios triaxiais (solo residual maduro - CPs saturados) | 231 |
| Figura 129. Envoltória transformada - ensaios triaxiais (solo residual jovem - CPs saturados) | 232 |
| Figura 130. Localização das colunas A e B de grampos instrumentados | 235 |
| Figura 131. Posição dos grampos instrumentados (Cii e Gii), caixas de "tell tales" (Cx. TTi) e inclinômetros (Ii) | 236 |
| Figura 132. Seção-tipo instrumentada com grampos com "strain-gauges" (Cii e Gii), "tell tales" (Cx. "Tell Tale" i) e inclinômetros (I1 e I2) | 236 |
| Figura 133. Localização e orientação dos tubos de inclinômetros instalados | 238 |
| Figura 134. Detalhes da instalação e operação do inclinômetro | 240 |
| Figura 135. Hipóteses de cálculo dos deslocamentos do inclinômetro I1 | 241 |

| | |
|---|-----|
| Figura 136. Esquema da instrumentação com “tell tales” _____ | 242 |
| Figura 137. Detalhes da instalação e operação com o “tell tales” _____ | 243 |
| Figura 138. Posicionamento dos “strain-gauges” nas barras instrumentadas _____ | 246 |
| Figura 139. Extensômetro colável de resistência elétrica unidirecional simples _____ | 246 |
| Figura 140. Detalhes da instrumentação dos grampos no galpão _____ | 249 |
| Figura 141. Detalhes da instalação das barras instrumentadas _____ | 250 |
| Figura 142. Ponte de Wheatstone com extensômetro elétrico (R_g) e fio compensador (L_2) com mesmo comprimento de L_1 e L_3 , ($\frac{1}{4}$ de ponte com 3 fios) _____ | 251 |
| Figura 143. Detalhes dos equipamentos utilizados para instrumentação dos grampos _____ | 252 |
| Figura 144. Arranjo da instrumentação de campo e aquisição de dados _____ | 253 |
| Figura 145. Detalhes do sistema de aquisição de dados no campo dos grampos _____ | 253 |
| Figura 146. Sistema dos ensaios de calibração das barras _____ | 254 |
| Figura 147. Instrumentação de uma barra de aço submetida à flexão _____ | 256 |
| Figura 148. Solução de estabilização ao final da construção (seção-tipo) _____ | 259 |
| Figura 149. Fatores de segurança globais (FS) do “Museu 1” para os diferentes níveis de sucção de camp. _____ | 263 |
| Figura 150. Esforços axiais máximos em cada grampo instrumentado para os diferentes níveis de sucção de campo _____ | 265 |
| Figura 151. Deslocamentos horizontais na direção principal do Inclinômetro I1 - Hipótese 1 _____ | 267 |
| Figura 152. Deslocamentos horizontais na direção principal do Inclinômetro I1 - Hipótese 2 _____ | 268 |
| Figura 153. Deslocamentos horizontais na direção principal do Inclinômetro I2 _____ | 269 |
| Figura 154. Deslocamentos horizontais na direção secundária do Inclinômetro I1 - Hipótese 1 _____ | 272 |
| Figura 155. Deslocamentos horizontais na direção secundária do Inclinômetro I1 - Hipótese 2 _____ | 273 |
| Figura 156. Deslocamentos horizontais na direção secundária do Inclinômetro I2 _____ | 274 |
| Figura 157. Deslocamentos fornecidos pelos “tell tales” da caixa 1 - Face C_ _____ | 276 |
| Figura 158. Deslocamentos fornecidos pelos “tell tales” da caixa 5 - Face G_ _____ | 277 |
| Figura 159. Força de tração nos grampos C07 e C09 a 3m da face - SG1s _____ | 278 |

| | |
|---|-----|
| Figura 160. Força de tração nos grampos G07 e G09 a 3m da face - SG1s | 279 |
| Figura 161. Avaliação da flexão no grampo C07 a 3m da face - SG1 | 281 |
| Figura 162. Avaliação da flexão no grampo G07 a 3m da face - SG1 | 282 |
| Figura 163. Deslocamento horizontal máximo fornecido pelos inclinômetros (direção principal) | 285 |
| Figura 164. Deslocamento horizontal máximo fornecido pelos inclinômetros (direção secundária) | 286 |
| Figura 165. Deslocamento horizontal máximo observado em taludes grampeados | 289 |
| Figura 166. A evolução da movimentação horizontal máxima, durante os sucessivos estágios de escavação | 290 |
| Figura 167. Estimativa da movimentação horizontal máxima do talude grampeado | 291 |
| Figura 168. Deslocamento dos “tell tales” em 3 fases do monitoramento | 293 |
| Figura 169. Região de maiores deslocamentos fornecidos pelos “tell tales” | 294 |
| Figura 170. Força axial, ao longo do grampo C07 durante todo o monitoramento | 296 |
| Figura 171. Força axial ao longo do grampo G07 durante todo o monitoramento | 296 |
| Figura 172. Distribuição das forças axiais nos grampos instrumentados em 3 fases do monitoramento | 299 |
| Figura 173. Determinação da região de máximos esforços ($T=T_{máx}$) ao final da construção | 301 |
| Figura 174. Comparação das superfícies potenciais de ruptura (Instrumentação x Equilíbrio Limite) | 303 |
| Figura 175. Força de tração máxima ($F_{máx}$) durante todo o monitoramento | 305 |
| Figura 176. Força de tração máxima normalizada ($F_{máx} / F_{esc}$) durante a escavação em solo grampeado | 306 |
| Figura 177. Força de tração máxima normalizada ($F_{máx} / F_{esc}$) em escavação grampeadas em solo residual de gnaiss | 307 |
| Figura 178. Distribuição dos esforços axiais nos grampos (4 hipóteses de cálculo) | 309 |
| Figura 179. Mobilização da resistência ao cisalhamento solo-grampo (q_s) | 311 |
| Figura 180. Relação entre a tração na face (T_o) e tração máxima ($T_{máx}$) vs. profundidade (z) do reforço normalizada pela altura total da escavação (H) | 312 |
| Figura 181. Comparação entre as forças de tração medidas na face do talude (x=1m), ao final da construção e em serviço e as calculadas pela FHWA | 312 |

| | |
|--|-----|
| Figura 182. Variação da força de tração máxima nos grampos com a profundidade (final da construção e em serviço) | 314 |
| Figura 183. Força axial máxima normalizada ($F_{máx}^N$) vs. z/H para a estrutura em serviço | 315 |
| Figura 184. Vista do talude grampeado - Face G | 317 |
| Figura 185. Deslocamentos horizontais na direção principal | 318 |
| Figura 186. Deslocamentos fornecidos pelos “tell tales” durante o processo de escavação acelerada | 319 |
| Figura 187. Mobilização dos grampos instrumentados durante o processo de escavação acelerada | 320 |
| Figura 188. Deslocamentos horizontais máximos no talude (direção principal), período de Maio a Julho de 2004 | 322 |
| Figura 189. Tração a 1m da face (grampo G07), período de Maio a Julho de 2004 | 322 |
| Figura 190. Monitoramento dos grampos da coluna A - face C durante o período de chuva intensa (Julho de 2004) | 325 |
| Figura 191. Deslocamentos horizontais na direção principal do Inclinômetro I1 (hipótese 2) em Julho de 2004. | 326 |
| Figura 192. Deslocamentos fornecidos pelos “tell tales” em Julho de 2004 | 327 |
| Figura 193. Deslocamentos horizontais na direção secundária devidos às escavações do “Museu 2” | 328 |
| Figura 194. Variação da força axial máxima nos grampos instrumentados devidas às escavações do “Museu 2” | 329 |

Lista de tabelas

| | |
|---|-----|
| Tabela 1. Tipo de solicitação em reforço de solo _____ | 36 |
| Tabela 2. Aplicações e objetivos de um sistema de reforço _____ | 36 |
| Tabela 3. Altura das etapas de escavação _____ | 40 |
| Tabela 4. Tipos de grampos utilizados no Brasil _____ | 43 |
| Tabela 5. Dimensões e propriedades típicas de grampos injetados em obras na Europa _____ | 44 |
| Tabela 6. Dimensões de grampos injetados em obras na América do Norte ____ | 44 |
| Tabela 7. Parâmetros típicos de maciços grampeados em obras internacionais _____ | 56 |
| Tabela 8. Parâmetros típicos de maciços grampeados (solos diversos) em obras nacionais _____ | 63 |
| Tabela 9. Parâmetros típicos de maciços grampeados (solos diversos) em obras nacionais _____ | 64 |
| Tabela 10. Parâmetros típicos de maciços grampeados (solos diversos) em obras nacionais _____ | 65 |
| Tabela 11. Parâmetros típicos de maciços grampeados (solos diversos) em obras nacionais _____ | 65 |
| Tabela 12. Custo médio para execução de solo grampeado nos EUA _____ | 68 |
| Tabela 13. Espessuras extras em função do tempo de vida útil da estrutura ____ | 76 |
| Tabela 14. Número de ensaios de arrancamento recomendado pelo Projeto Clouterre _____ | 79 |
| Tabela 15. Estimativa da resistência ao cisalhamento no contato solo-grampo, q_s _____ | 81 |
| Tabela 16. Ensaios de arrancamento em solos brasileiros _____ | 84 |
| Tabela 17. Determinação de q_s por correlações empíricas _____ | 90 |
| Tabela 18. Valores típicos de κ e deslocamentos verticais e horizontais máximos baseados em resultados empíricos _____ | 104 |
| Tabela 19. Índices característicos das obras internacionais em solo granular grampeado com inclinação superior a 80° _____ | 111 |
| Tabela 20. Índices característicos em obras com grampos injetados na Grã-Bretanha _____ | 111 |
| Tabela 21. Valores típicos de projetos em estruturas de solo grampeado - $H \leq 5m$, solos homogêneos, sem NA, sem sobrecargas, paramento vertical, grampos injetados _____ | 112 |

| | |
|--|-----|
| Tabela 22. Características dos métodos de cálculo em solo grampeado _____ | 116 |
| Tabela 23. Características das descontinuidades do talude _____ | 156 |
| Tabela 24. Sondagens na obra “Museu 1” _____ | 157 |
| Tabela 25. Resumo das análises realizadas na fase de projeto _____ | 162 |
| Tabela 26. Propriedades geomecânicas dos solos nas análises numéricas _ | 163 |
| Tabela 27. Quadro-resumo das análises realizadas _____ | 164 |
| Tabela 28. Resumo dos detalhes executivos _____ | 178 |
| Tabela 29. Ensaios de laboratório realizados _____ | 181 |
| Tabela 30. Descrição e localização das amostras coletadas _____ | 182 |
| Tabela 31. Densidade dos grãos _____ | 183 |
| Tabela 32. Resultados dos ensaios de caracterização _____ | 184 |
| Tabela 33. Dados do corpo de prova (solo residual maduro - B2M) _____ | 197 |
| Tabela 34. Dados do corpo de prova (solo residual jovem - B6M) _____ | 197 |
| Tabela 35. Resultados do ensaio de compressão confinada (solo residual maduro - B2M), com correção da deformabilidade do sistema _____ | 198 |
| Tabela 36. Resultados do ensaio de compressão confinada (solo residual jovem - B6M), com correção da deformabilidade do sistema _____ | 198 |
| Tabela 37. Parâmetros de compressibilidade e tensão de escoamento _____ | 200 |
| Tabela 38. Características dos corpos de prova dos ensaios de cisalhamento direto _____ | 203 |
| Tabela 39. Parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo residual _____ | 206 |
| Tabela 40. Campanha experimental de ensaios triaxiais CID e CID-E _____ | 209 |
| Tabela 41. Índices físicos dos corpos de prova do bloco B2M (solo residual maduro) _____ | 212 |
| Tabela 42. Resultados dos ensaios triaxiais drenados - bloco B2M (solo residual maduro) _____ | 214 |
| Tabela 43. Identificação dos ensaios realizados no bloco B6M (solo residual jovem) _____ | 215 |
| Tabela 44. Índices físicos dos corpos de prova do bloco B6M (solo residual jovem) _____ | 216 |
| Tabela 45. Resultados dos ensaios triaxiais drenados E1-E2 - bloco B6M (solo residual jovem) - CP na umidade natural _____ | 217 |
| Tabela 46. Resultados dos ensaios triaxiais drenados E5-E6-E7 - bloco B6M (solo residual jovem) - CP saturado _____ | 217 |

| | |
|---|-----|
| Tabela 47. Resultados dos ensaios triaxiais drenados E3-E4 e E5-E6-E7 - bloco B6M (solo residual jovem) _____ | 219 |
| Tabela 48. Índices físicos dos corpos de prova do bloco B3MS (solo residual maduro) _____ | 223 |
| Tabela 49. Resultados dos ensaios triaxiais drenados E1-E2-E3 - bloco B3MS (solo residual maduro) _____ | 224 |
| Tabela 50. Resultados dos ensaios triaxiais drenados E4-E5-E6 - bloco B3MS (solo residual maduro) _____ | 225 |
| Tabela 51. Índices físicos dos corpos de prova do bloco B6MS (solo residual jovem) _____ | 226 |
| Tabela 52. Resultados dos ensaios triaxiais drenados E1-E2-E3 - bloco B6MS (solo residual jovem) _____ | 227 |
| Tabela 53. Resultados dos ensaios triaxiais drenados E4-E5-E6 - bloco B6MS (solo residual jovem) _____ | 227 |
| Tabela 54. Parâmetros de resistência e deformabilidade (ensaios triaxiais CID e CID-E) _____ | 229 |
| Tabela 55. Dados da execução dos furos dos inclinômetros _____ | 238 |
| Tabela 56. Características da unidade de leitura _____ | 239 |
| Tabela 57. Características da instrumentação com “tell tales” _____ | 244 |
| Tabela 58. Resumo do processo executivo dos grampos instrumentados _____ | 245 |
| Tabela 59. Propriedades geomecânicas (novas análises) _____ | 259 |
| Tabela 60. Resumo das análises complementares realizadas _____ | 260 |
| Tabela 61. Comparação dos valores de índices característicos em obras de solo grampeado (grampos injetados) _____ | 261 |
| Tabela 62. Comparação dos valores típicos de projetos em estruturas de solo grampeado _____ | 261 |
| Tabela 63. Resumo dos parâmetros e resultados das análises de estabilidade considerando o efeito da sucção _____ | 263 |
| Tabela 64. Deslocamentos horizontais máximos calculados com os inclinômetros _____ | 288 |
| Tabela 65. Deslocamentos fornecidos pelos “tell tales” e inclinômetros _____ | 292 |

Lista de símbolos

| | |
|----------------|---|
| A_s : | Área da seção transversal útil da barra; |
| a' : | Parâmetro efetivo de resistência da envoltória transformada; |
| A/C: | Fator água-cimento; |
| a_v : | Coeficiente de compressibilidade; |
| α : | Ângulo de inclinação do reforço com o plano horizontal (ângulo de instalação); |
| α' : | Parâmetro efetivo de resistência da envoltória transformada; |
| B: | Largura do bloco monolítico; |
| B : | Parâmetro de Skempton (1954); |
| β : | Ângulo de inclinação do talude; |
| c: | Coesão total ou aparente do solo; |
| c' : | Coesão efetiva do solo; |
| c_v : | Coeficiente de adensamento do solo; |
| c_a' : | Adesão da interface; |
| CP w_{nat} : | Corpo de prova cisalhado na umidade natural; |
| CP w_{sub} : | Corpo de prova cisalhado em condições de submersão em água; |
| Cx.: | Caixa; |
| CID: | Ensaio triaxial drenado de carregamento axial; |
| CID-E: | Ensaio triaxial drenado de descarregamento lateral; |
| C_c : | Índice de compressão; |
| C_r : | Índice de recompressão; |
| CNU: | Coeficiente de não uniformidade; |
| CC: | Coeficiente de curvatura |
| CP: | Corpo de prova; |
| d: | Densidade do grampeamento; |
| D: | Módulo de compressão edométrica; |
| DHP: | Dreno subhorizontal profundo; |
| D_{DEF} : | Distância da estrutura ao topo da escavação onde δ_h e δ_v são nulos; |
| D_{10} : | Diâmetro abaixo do qual se situam 10% em peso das partículas; |
| D_{30} : | Diâmetro abaixo do qual se situam 30% em peso das partículas; |

| | |
|--|--|
| D_{60} : | Diâmetro abaixo do qual se situam 60% em peso das partículas; |
| δ : | Deslocamento; |
| δ_0 : | Deslocamento horizontal máximo na superfície, atrás do bloco; |
| δ' : | Ângulo de atrito da interface; |
| δ_v : | Deslocamento vertical; |
| δ_h : | Deslocamento horizontal; |
| $\delta_h^{\text{máx.}}$: | Deslocamento horizontal máximo; |
| $\delta_h^{\text{máx.}}(\text{esp})$: | Deslocamento horizontal máximo esperado; |
| $\delta_h^{\text{dir princ}}$: | Deslocamento horizontal na direção principal; |
| $\delta_h^{\text{dir sec}}$: | Deslocamento horizontal na direção secundária; |
| δ_h^{I1} : | Deslocamento horizontal fornecido pelo inclinômetro I1; |
| δ_h^{I2} : | Deslocamento horizontal fornecido pelo inclinômetro I2; |
| ΔL : | Varição de voltagem dos terminais (da ponte de Wheatstone); |
| ΔR : | Varição de resistência elétrica do fio (em Ohms); |
| ESC: | Escavação; |
| EL: | Elevação; |
| E: | Módulo de elasticidade do solo; |
| $E_{\text{aço}}$: | Módulo de elasticidade da barra de aço; |
| E_{50} : | Módulo de deformabilidade do solo correspondente à 50% da carga aplicada na ruptura; |
| ε_{ax} : | Deformação axial; |
| $\varepsilon_{\text{ax}_{50}}$: | Deformação axial do solo correspondente à 50% da carga aplicada na ruptura; |
| ε_{af} : | Deformação axial do solo correspondente à carga aplicada na ruptura; |
| $\varepsilon_{\text{vol}_{50}}$: | Deformação volumétrica do solo correspondente à 50% da carga aplicada na ruptura; |
| ε_v : | Deformação volumétrica; |
| e: | Índice de vazios; |
| e_0 : | Índice de vazios inicial; |
| ε : | Deformação específica; |
| ε_1 : | Deformação específica do "strain-gauge" na face superior; |

| | |
|-----------------------|---|
| ε_2 : | Deformação específica do “strain-gauge” na face inferior; |
| ε_b : | Deformação específica resultante da flexão da barra; |
| FHWA: | “Federal Highway Administration”; |
| FS: | Fator de segurança; |
| F_{esc} : | Força de escoamento do aço |
| $F_{m\acute{a}x}$: | Força axial máxima no grampo; |
| F_{axial} : | Força axial no grampo; |
| F: | Força; |
| $F_{m\acute{a}x}^N$: | Força axial máxima normalizada; |
| f: | Profundidade da ficha |
| ϕ_{int} : | Diâmetro interno (tubo do inclinômetro); |
| ϕ_{cp} : | Diâmetro do corpo de prova; |
| $\phi_{aço}$: | Diâmetro da barra de aço; |
| ϕ_{furo} : | Diâmetro do furo do grampo ou do tirante; |
| ϕ : | Ângulo de atrito do solo; |
| ϕ' : | Ângulo de atrito efetivo do solo; |
| ϕ^b : | Ângulo de resistência com relação à variação da sucção mátrica; |
| G_s : | Densidade real dos grãos; |
| GL: | Grampo livre; |
| GF: | Grampo fixo; |
| Gf: | “Gauge-factor” (constante característica do extensômetro); |
| γ : | Peso específico do solo; |
| γ_s : | Peso específico dos sólidos; |
| γ_{sat} : | Peso específico aparente saturado; |
| γ_{nat} : | Peso específico natural; |
| γ_w : | Peso específico da água; |
| γ_d : | Peso específico aparente seco; |
| γ_{do} : | Peso específico aparente seco (inicial); |
| H: | Altura total do talude ou da escavação; |
| $H_{escav.}$: | Incremento de escavação (altura de cada etapa de escavação); |
| H_{SG}^{I1} : | Altura do talude grampeado onde está instalado o inclinômetro I1; |

| | |
|------------------------|---|
| H_{SG}^{I2} : | Altura do talude grampeado onde está instalado o inclinômetro I2; |
| H_{escav}^{SG} : | Altura total da escavação em solo grampeado; |
| H_1 : | Altura de suporte efetiva; |
| H_{CP} : | Altura do corpo de prova; |
| h_{parede} : | Espessura da parede; |
| IC: | Índice de consistência; |
| I1: | Inclinômetro 1; |
| I2: | Inclinômetro 2; |
| ISRM | “International Society for Rock Mechanics”; |
| I_b : | Momento de inércia de uma barra de aço de seção circular; |
| IRS: | Um estágio de injeção; |
| IGU: | Múltiplo estágio de injeção; |
| IP: | Índice de plasticidade do solo; |
| JRC: | Coeficiente de rugosidade da junta; |
| k: | Coeficiente de permeabilidade do solo (condutividade hidráulica); |
| k_β : | Rigidez do grampo; |
| K_{ST} : | Fator de sensibilidade do “strain-gauge”; |
| K: | Coeficiente que expressa o estado de tensões do maciço grampeado; |
| K_o : | Coeficiente de empuxo no repouso do solo; |
| K_a : | Coeficiente de empuxo ativo do solo; |
| K_p : | Coeficiente de empuxo passivo do solo; |
| κ : | Coeficiente empírico utilizado na determinação de D_{DEF} ; |
| Leitura _N : | Leitura fornecida pelo instrumento na direção N; |
| Leitura _S : | Leitura fornecida pelo instrumento na direção S; |
| L_{ij} : | Saída da ponte (sinal de saída em Volts); |
| L: | Comprimento do grampo e/ou do tirante; |
| LL: | Limite de liquidez do solo; |
| LP: | Limite de plasticidade do solo; |
| $L_{máx}$: | Comprimento máximo dos grampos; |
| L_m : | Distância entre medidas (inclinômetro); |
| L_{bulbo} : | Comprimento do bulbo; |
| L_p : | Comprimento do grampo na zona passiva; |

| | |
|---------------------|---|
| L_{inj} : | Comprimento do trecho injetado do grampo (ensaio de arrancamento); |
| L_{TT} : | Comprimento do cabo de aço do “tell tale”; |
| L_{livre} : | Comprimento do trecho livre do tirante; |
| L_1 : | Fio compensador 1; |
| L_2 : | Fio compensador 2; |
| L_3 : | Fio compensador 3; |
| L_i : | Voltagem dos terminais da ponte de Wheatstone, obtida por tratamento estatístico, das leituras na data considerada; |
| L_o : | Voltagem dos terminais da ponte de Wheatstone, obtida por tratamento estatístico, das leituras na data inicial da instrumentação; |
| LVDT: | “Linear variable differential transformer”; |
| l_o : | Trecho flexionado do grampo; |
| λ_i : | Fator de carga; |
| M : | Momento fletor no grampo; |
| m_v : | Coefficiente de variação volumétrica; |
| $M_{m\acute{a}x}$: | Momento fletor máximo no grampo; |
| MAC: | Museu de Arte Contemporânea; |
| MEF: | Método dos elementos finitos; |
| MDF: | Método das diferenças finitas; |
| NATM: | “New Austrian Tunneling Method”; |
| NA: | Nível d’água; |
| NAT: | Natural; |
| $N(SPT)$: | Número de golpes do ensaio SPT; |
| N : | Parâmetro adimensional de rigidez à flexão; |
| n : | Porosidade; |
| n_o : | Porosidade inicial; |
| η : | Inclinação do paramento/parede com a vertical; |
| ν : | Coefficiente de Poisson do solo; |
| ν_{50} : | Coefficiente de Poisson do solo correspondente à 50% da carga aplicada na ruptura; |
| p_t : | Tensão aplicada pelo terreno na direção normal ao eixo do elemento de reforço; |
| p' : | Média das tensões principais efetivas σ'_1 e σ'_3 ; |
| p : | Média das tensões principais totais σ_1 e σ_3 ; |

| | |
|--------------|--|
| p_f' : | Média das tensões principais efetivas na ruptura; |
| p_f : | Média das tensões principais totais na ruptura; |
| $p_o(z)$: | Empuxos de terra atuantes; |
| $p_{máx}$: | Tensão máxima aplicada pelo terreno na direção normal ao eixo do elemento de reforço (pressão de reação do terreno); |
| P_{inj} : | Pressão de injeção da calda de cimento; |
| p_1 : | Pressão limite do pressiômetro Ménard; |
| PR//: | Plano de ruptura paralelo à xistosidade; |
| PR \perp : | Plano de ruptura perpendicular à xistosidade; |
| Q: | Resistência mobilizada por unidade de comprimento; |
| Q_u : | Incremento de transferência de força última (resistência ao arrancamento por unidade de comprimento); |
| q_i : | Mobilização da resistência ao cisalhamento na interface solo-grampo; |
| q : | Semidiferença das tensões principais totais σ_1 e σ_3 ; |
| q_f : | Semidiferença das tensões principais totais na ruptura; |
| q_u : | Resistência solo-grampo; |
| q_s : | Resistência ao cisalhamento no contato solo-grampo; |
| R_T : | Resistência do grampo; |
| R_F : | Resistência à ruptura na face; |
| R_P : | Força resistente de arrancamento; |
| R_g : | Resistência elétrica desconhecida do “strain-gauge”; |
| R_i : | Resistência elétrica nominal do “strain-gauge”; |
| R: | Resistência elétrica do fio (em Ohms); |
| SG: | Solo grampeado; |
| SG0: | “Strain-gauge” (numeração); |
| SAD: | Sistema de aquisição de dados; |
| SPT: | Ensaio de Penetração Padrão (“Standard Penetration Test”); |
| SPT-T: | Ensaio de Penetração Padrão com medição de torque; |
| SRM: | Solo residual maduro; |
| SRJ: | Solo residual jovem; |
| SAT: | Saturado(a); |
| SIC: | “Standard Incremental Consolidation”; |
| s_h : | Espaçamento horizontal entre grampos; |
| s_v : | Espaçamento vertical entre grampos; |
| S_o : | Grau de saturação inicial; |

| | |
|--------------------------|--|
| S_f : | Grau de saturação final; |
| $S_{m\acute{a}x}$: | Máximo espaçamento entre grampos; |
| S : | Grau de saturação; |
| SUCS: | Sistema Unificado de Classificação dos Solos; |
| S_u : | Resistência não drenada; |
| SR: | Solo residual; |
| $\sigma_{a\grave{c}o}$: | Tensão de escoamento do aço; |
| σ_d : | Tensão desviadora; |
| σ_{df} : | Tensão desviadora correspondente à carga aplicada na ruptura; |
| σ_{d50} : | Tensão desviadora correspondente à 50% da carga aplicada na ruptura; |
| σ_v : | Tensão vertical total; |
| σ'_v : | Tensão vertical efetiva; |
| σ'_c : | Tensão confinante efetiva; |
| σ_h : | Tensão horizontal total; |
| σ_n : | Tensão de confinamento vertical (tensão normal); |
| σ_{ng} : | Tensão normal aplicada ao grampo; |
| σ_{1f} : | Tensão principal maior no instante da ruptura; |
| σ_1 : | Tensão principal maior; |
| σ_3 : | Tensão principal menor; |
| σ_c : | Tensão confinante; |
| σ_{esc} : | Tensão de escoamento; |
| σ_a : | Tensão axial; |
| σ : | Tensão total; |
| σ' : | Tensão efetiva; |
| t : | Tempo; |
| T : | Força de tração no grampo; |
| TT: | “Tell tale”; |
| T_{ensaio} : | Carga máxima de ensaio; |
| $T_{trabalho}$: | Carga de trabalho; |
| $T_{escoamento}$: | Carga de escoamento do aço; |
| $T_{ruptura}$: | Carga de ruptura do aço; |
| T_N : | Força normal máxima (carga que leva o grampo à ruptura por cisalhamento com o solo no ensaio de arrancamento); |

| | |
|------------------------|---|
| $T'_{m\acute{a}x}$: | Carga máxima do ensaio de arrancamento; |
| $T_{m\acute{a}x}$: | Força de tração máxima; |
| $T_{m\acute{a}x-s}$: | Força de tração máxima obtida a partir dos resultados de análises de estabilidade global; |
| T_o : | Tração na cabeça do grampo (face da escavação); |
| T_i : | Carga de incorporação; |
| T_G : | Resistência à tração da barra de aço; |
| T_{pr} : | Força de tração na interseção com o plano de cisalhamento; |
| t_d : | Taxa de deslocamento |
| τ : | Tensão cisalhante; |
| τ_{mob} : | Tensão cisalhante mobilizada; |
| τ_r : | Resistência ao cisalhamento do solo; |
| $\tau_{m\acute{a}x}$: | Resistência ao cisalhamento no contato solo-nata; |
| θ : | Teor de umidade volumétrica; |
| θ_t : | Inclinação do tubo do inclinômetro em relação  vertical; |
| θ_T : | Inclinação da superfície do terreno; |
| u_w : | Poro-pressão; |
| u_a : | Pressão intersticial de ar; |
| v : | Velocidade de cisalhamento; |
| V_{exc} : | Voltagem de excitação da ponte (alimentação); |
| w_{nat} : | Teor de umidade natural do solo; |
| w_o : | Teor de umidade inicial do solo; |
| w_f : | Teor de umidade final do solo; |
| x : | Distância do “strain-gauge”  face da escavação; |
| y_{SG} : | Distância entre os segmentos do grampo fletido; |
| y_o : | Deslocamento da cabeça do grampo; |
| z : | Cota de instalação do grampo; |
| z_p : | Profundidade; |