

ALESSANDER C. MORALES KORMANN

COMPORTAMENTO GEOMECÂNICO
DA FORMAÇÃO GUABIROTUBA:
ESTUDOS DE CAMPO E LABORATÓRIO

Tese apresentada à Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo para
obtenção do Título de Doutor em
Engenharia

Área de Concentração:
Engenharia de Solos

Orientador:
Prof. Titular Faiçal Massad

São Paulo
2002

FICHA CATALOGRÁFICA

Kormann, Alessander Christopher Morales

**Comportamento geomecânico da Formação Guabirotuba:
estudos de campo e laboratório / Alessander Christopher Morales
Kormann. -- São Paulo, 2002.**

429p.

**Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São
Paulo. Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações.**

**1.Formação Guabirotuba 2.Argilas rijas fraturadas 3.Ensaio
geotécnicos de campo 4.Ensaio geotécnicos de laboratório
I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de
Engenharia de Estruturas e Fundações II.t.**

*Este trabalho é dedicado a todos
aqueles que possuem ideais.*

AGRADECIMENTOS

A pesquisa descrita ao longo desta tese tornou-se possível graças à colaboração de estudantes, profissionais, instituições e empresas. Os agradecimentos que se seguem são um justo registro de seu empenho.

Na Escola Politécnica da USP, o autor pôde contar com o entusiasmo e a cooperação de docentes e colegas de pós-graduação. Ao Prof. Faiçal Massad, pela orientação e apoio recebidos, que em muito acrescentaram ao trabalho. Ao Prof. Carlos de Sousa Pinto, por ter viabilizado a execução de ensaios com o pressiômetro autoperfurante. Ao colega João Luiz Sampaio Jr, que executou e analisou as investigações pressiométricas. Ao Prof. Fernando Marinho, pelas sugestões e discussões referentes às medições de sucção.

Em Curitiba, a disposição e vontade de colegas permitiram o desenvolvimento de um amplo trabalho experimental. Ao Prof. Paulo Chamecki, cuja iniciativa e determinação foram decisivas na implantação do Sítio Experimental de Geotecnia da UFPR e na execução do programa de ensaios da pesquisa. Ao Laboratório de Materiais e Estruturas – LAME, inicialmente convênio entre a UFPR e a COPEL, e posteriormente unidade integrante do Instituto para Tecnologia e Desenvolvimento – LACTEC, pelo suporte fundamental dado ao estudo. Na pessoa do Eng. Ruy Dikran Steffen, o autor estende seu agradecimento a todos os integrantes do LAME.

Ao Prof. Ney Nascimento, pelo fornecimento de dados da Formação Guabirota. À Profa. Jocely Loyola, pela colaboração no mapeamento georreferenciado das informações. Aos Profs. Carlos Parchen e José de Almendra Freitas Neto, pelo auxílio nas obras de fundações do Sítio Experimental. Às empresas Calmix e Polimix, pelo fornecimento de concreto para estacas escavadas.

Aos Profs. Eduardo Salamuni e Alberto Fiori, pela interação em visitas ao campo e na troca de idéias sobre a geologia da Formação Guabirota. Ao LAMIR/UFPR, pela realização de análises com difratometria de raios-X. À Área de Materiais do LACTEC, pela colaboração nos estudos com microscopia eletrônica de varredura.

Aos colegas da In Situ Geotecnia, engenheiros Luiz Antoniutti Neto, Luiz Russo Neto e Luis Fernando Debas, pelo apoio na execução de provas de carga dinâmicas e ensaios de integridade nas estacas do Sítio Experimental.

Aos geólogos Giuliano De Mio e Jeferson Guimarães, da Solum, pela realização de ensaios de cone e dilatômetro. Aos engenheiros Samuel Lopes e Oziel Lopes (Fundestac), James Barossi (Sondar) e Ivo Rigler (Solotécnica), pela execução de sondagens a percussão. Ao Geól. Jorge Jacob (Datageo), pela participação nas investigações geotécnicas do Sítio Experimental.

Aos engenheiros Roberto Gazda e José Mário Olavo, da Ensolo, pela colaboração na execução de estacas escavadas. Ao Eng. Florio Fontolan Filho, da Engefe, pelo fornecimento do sistema de cravação das provas de carga dinâmicas em estacas escavadas. Ao Eng. Alexandre Chwist, da Premold, pela cooperação nas pesquisas. Ao importante apoio das empresas Geofix, Tecnosolo, PTS e Sondagel nos trabalhos de fundações e investigações geotécnicas do Sítio Experimental.

Citando Laryssa Ligocki, Alex Bueno, André Nagalli, Caroline Santos, Fernando Myamoto, Silvia Levis e Paulo Fornari, que participaram das etapas decisivas do programa experimental, o autor estende seu agradecimento a todos os valorosos estudantes que acompanharam a pesquisa.

A Roberta Boszczowski, sempre presente e disposta a ajudar.

A Judit, Rosendo, Aline e Adrian, minha família.

RESUMO

Os solos sobre-adensados da Formação Guabirota – principal unidade geológica de Curitiba e região metropolitana – são estudados, buscando-se alcançar um melhor entendimento de seu comportamento geomecânico. Uma revisão de aspectos geológicos é realizada, caracterizando-se o contexto regional, a gênese e os tipos de sedimentos da Formação Guabirota. Os dados disponíveis e informações referentes a argilas rijas e duras são analisados, no intuito de se identificar possíveis causas de problemas em obras geotécnicas. Ênfase é dada ao papel que as fraturas exercem no comportamento do material. Um amplo trabalho experimental é conduzido no Sítio Experimental de Geotecnia da UFPR, através de ensaios de campo e laboratório. As investigações geotécnicas envolvem desde o tradicional *SPT* e abertura de poços até ensaios de cone, dilatômetro e pressiômetro autopercussivo. Os trabalhos de campo contemplam o estudo de efeitos de escala na resistência ao cisalhamento do terreno, conduzindo-se ensaios de carregamento dinâmico em estacas escavadas com diferentes diâmetros. No laboratório, a composição e a estrutura do solo são analisadas com técnicas de difratometria de raios-X e microscopia eletrônica. Ensaios de caracterização permitem delinear propriedades índice do Sítio Experimental. Curvas características e ensaios de adensamento de solo indeformado e remoldado fornecem dados que auxiliam no entendimento da história de tensões. Os efeitos de escala, que se devem ao fraturamento do material, são avaliados também com ensaios de cisalhamento direto e triaxiais, utilizando-se amostras de diferentes dimensões. As conclusões da pesquisa permitem identificar possíveis agentes de sobre-adensamento, efeitos do intemperismo químico, fatores que interferem no estado de tensões de campo e mecanismos associados à resistência ao cisalhamento.

ABSTRACT

The overconsolidated soils of the Guabirotuba Geological Formation are studied in order to achieve a better understanding of its geotechnical behavior. These soils are the main occurrence in the Curitiba Metropolitan Area. A revision of its geology is provided. The genesis and the sediments are described. The available data of the soils and published information about stiff and hard clays are analyzed in order to understand the unexpected behavior of foundations, excavations and slopes. It is given emphasis to the role of the fissures in the material behavior. A comprehensive experimental work is carried out at the Geotechnical Experimentation Site of the UFPR including field and laboratory studies. The geotechnical investigation comprises *SPT*, exploratory trenches, cone penetration, dilatometer and self boring pressuremeter tests. Scale effects in bored piles are assessed with high strain dynamic tests performed in elements with different cross sections. In the laboratory the composition and the microfabric are analyzed with X-ray diffraction and electron microscopy. Laboratory index soil tests are presented. Consolidation tests and characteristic curves of undisturbed and remolded samples provide information related with the stress history. The scale effects due to the fissures are assessed with direct shear and triaxial testing of specimens with different sizes. The conclusions indicate possible overconsolidation factors, chemical weathering effects and mechanisms affecting the in situ stress state and the shear strength.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

LISTA DE SÍMBOLOS

1	INTRODUÇÃO.....	1
2	ASPECTOS GEOLÓGICOS DA FORMAÇÃO GUABIROTUBA	7
2.1	Introdução e Contexto Regional	7
2.2	A Bacia de Curitiba	9
2.3	Gênese e Evolução Geológica da Bacia de Curitiba.....	16
2.4	A Formação Guabirota	21
2.5	Comparação com Outras Unidades Sedimentares do <i>RCSB</i>	26
3	ASPECTOS GEOTÉCNICOS DA FORMAÇÃO GUABIROTUBA	31
3.1	Introdução.....	31
3.2	Composição Mineralógica e Propriedades Índice.....	37
3.3	Expansibilidade	43
3.4	Sobre-adensamento.....	46
3.5	Resistência de Pico e Residual	55
3.6	Formação Guabirota: Um Meio Fraturado	61
3.7	Deformabilidade	75
3.8	Indícios de Tensões Horizontais Elevadas.....	76
3.9	Fundações na Formação Guabirota	83
4	O SÍTIO EXPERIMENTAL DE GEOTECNIA DA UFPR – IMPLANTAÇÃO E ESTUDOS DE CAMPO.....	95
4.1	Introdução.....	95
4.2	Poços de Coleta de Amostras	100
4.3	Sondagens <i>SPT</i> e <i>SPT-T</i>	109
4.4	Piezômetros	123
4.5	Ensaio de Cone	125
4.6	Ensaio Dilatométrico	145
4.7	Ensaio com Pressiômetro Autoperfurante.....	150
4.8	Ensaio de Carregamento Dinâmico em Estacas Escavadas Mecanicamente	170
4.8.1	Introdução e Objetivos.....	170
4.8.2	Características das Estacas	174
4.8.3	Estimativas de Capacidade de Suporte	177
4.8.4	Ensaio e Análises Preliminares	180
4.8.5	Execução das Estacas	184
4.8.6	Ensaio de Carregamento Dinâmico.....	193
4.8.7	Análises <i>CAPWAP</i>	208

5	ENSAIOS DE LABORATÓRIO COM AMOSTRAS DO SÍTIO EXPERIMENTAL.....	217
5.1	Amostras Utilizadas e Programa de Ensaios	217
5.2	Análises de Composição e Micro-estrutura	221
5.2.1	Difratometria de Raios-X.....	221
5.2.2	Microscopia Eletrônica de Varredura.....	223
5.3	Ensaio de Caracterização	235
5.4	Ensaio de Adensamento.....	245
5.5	Obtenção de Relações de Sucção com Papel Filtro	258
5.6	Ensaio de Cisalhamento Direto.....	280
5.7	Ensaio Triaxiais <i>CIU</i>	296
6	INTERPRETAÇÃO DOS ENSAIOS: DISCUSSÃO DE PROPRIEDADES GEOTÉCNICAS DO SOLO	315
6.1	Introdução.....	315
6.2	Investigações de Campo: Tendências Gerais	316
6.3	Investigações de Campo: Análises e Correlações	320
6.3.1	Comparação entre as Sondagens <i>SPT</i> , <i>SPT-T</i> e <i>CPT</i>	320
6.3.2	Classificação do Solo	323
6.3.3	Resistência Não-Drenada	329
6.3.4	Pressão de Pré-adensamento e Razão de Sobre-adensamento.....	338
6.3.5	Parâmetros de Deformabilidade	340
6.3.6	Tensões Horizontais – Coeficiente de Empuxo no Repouso.....	342
6.4	Efeitos de Escala no Campo: Provas de Carga Dinâmicas em Estacas Escavadas.....	346
6.5	Ensaio de Laboratório: Propriedades Índice no Perfil em Estudo.....	359
6.6	Ensaio de Adensamento x Curvas Características: Compressibilidade e História de Tensões	365
6.7	Resistência ao Cisalhamento: Efeitos de Escala em Laboratório	380
7	CONCLUSÕES.....	393
7.1	Evolução Geológica	393
7.2	O Sítio Experimental de Geotecnia da UFPR - Caracterização dos Perfis	396
7.3	Investigações Geotécnicas de Campo.....	398
7.4	Fatores Intervenientes na Compressibilidade e Sucção Matricial	399
7.5	Efeitos de Escala no Campo e em Laboratório – Influências das Fraturas	401
7.6	Comportamento Geomecânico da Formação Guabirotuba – Possíveis Mecanismos Intervenientes	404
7.7	Considerações Finais.....	408
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	411

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Localização da Bacia Sedimentar de Curitiba (E. Salamuni e R. Salamuni, 1999).	10
Figura 2.2. Algumas bacias do <i>Rift</i> Continental do Sudeste do Brasil (Salamuni, 1998).....	10
Figura 2.3. Mapa geológico de Curitiba e arredores (Salamuni, 1998).....	11
Figura 2.4. Mapa morfoestrutural do embasamento da Bacia de Curitiba (Salamuni, 1998).....	13
Figura 2.5. Mapa de tendência da superfície da Bacia de Curitiba (Salamuni, 1998).....	14
Figura 2.6. Mapa de isopropfundidades do nível do terreno em relação ao embasamento na Bacia de Curitiba (Salamuni, 1998).	15
Figura 2.7. Superfícies de aplainamento na região de Curitiba (Bigarella et al., 1961 apud Salamuni, 1998).	17
Figura 2.8. Distribuição de fácies na Bacia de Curitiba (E. Salamuni e R. Salamuni, 1999).	21
Figura 2.9. Argila da Formação Guabirotuba exibindo um plano de falha (Salamuni, 1998).....	22
Figura 2.10. Perfil da Formação Guabirotuba (Felipe, 1999).....	25
Figura 3.1. Perfis geotécnicos da Formação Guabirotuba.	33
Figura 3.2. Umidade versus profundidade na Formação Guabirotuba.	39
Figura 3.3. Curvas granulométricas de sedimentos da Bacia de Curitiba (Duarte, 1986).	39
Figura 3.4. Posição dos sedimentos no Gráfico de Plasticidade.....	40
Figura 3.5. Atividade dos sedimentos.	41
Figura 3.6. Aspecto do “empastilhamento” em uma superfície ressecada de argila – Formação Guabirotuba (Felipe, 1999).	46
Figura 3.7. Exemplos de processos erosivos na Formação Guabirotuba, causados pela exposição de materiais expansivos (Mineropar, 1994 apud Felipe, 1999).....	46
Figura 3.8. Curva índice de vazios <i>versus log</i> pressão efetiva – argila siltosa da Formação Guabirotuba (Duarte, 1986).	47
Figura 3.9. Variação do <i>OCR</i> com a profundidade (dados da Tabela 3.1).	51
Figura 3.10. Relações entre a cota do terreno e dados de ensaios de adensamento.....	53
Figura 3.11. Correlação entre o índice de vazios e a pressão de pré-adensamento.	54
Figura 3.12. Relação entre o peso específico natural, pressão de pré-adensamento e cota.	54
Figura 3.13. Curvas tensão cisalhante × deslocamento horizontal (Kormann et al., 1999d).....	57
Figura 3.14. Tensão cisalhante máxima × tensão normal (Kormann et al., 1999d).	58
Figura 3.15. Envoltórias de resistência residual – Formação Guabirotuba (Duarte, 1986).....	61
Figura 3.16. Influência das dimensões do corpo de prova na resistência (apud Lo, 1970).	66
Figura 3.17. Mobilização da resistência não-drenada em função do diâmetro da estaca (de Beer, 1977 apud Terzaghi et al., 1996).....	67
Figura 3.18. Resistência da argila de Londres (Marsland, 1972).	71
Figura 3.19. Redução da resistência devido ao “amolecimento” (apud Morgenstern, 1977 e Skempton, 1977).	73
Figura 3.20. Evolução de K_0 com o sobre-adensamento.	77
Figura 3.21. Curva e × \log pressão efetiva da amostra 10 – Tabela 3.1 (dados de Nascimento, 1992).81	
Figura 3.22. Fundações em Curitiba (Chamecki et al., 2001).	85
Figura 3.23. Comparações entre resultados de provas de carga de estacas cravadas e previsões de métodos semi-empíricos (Vianna, 2000).	88
Figura 3.24. Perfil geotécnico e arranjo das estacas hélice-contínua por ocasião dos ensaios dinâmicos – Sítio Experimental de Geotecnia da UFPR – Área 1 (Kormann et al., 2000b).	91
Figura 3.25. Resultados de provas de carga estáticas nas estacas CFA-1 e CFA-2 (Kormann et al., 1999a).	91
Figura 3.26. Comparações entre resultados de provas de carga de estacas hélice contínua e previsões de métodos semi-empíricos (Kormann et al., 1999a).....	92

Figura 3.27. Inspeção do fuste e extração de estacas hélice-contínua – Sítio Experimental de Geotecnia da UFPR.	93
Figura 3.28. Resultados das provas de carga estáticas e das simulações do programa CAPWAP, para as estacas CFA-1 (a) e CFA-2 (b) (Kormann et al., 2000b; 2000c).....	94
Figura 4.1. Implantação do Centro Politécnico da UFPR, Jardim das Américas, Curitiba.	97
Figura 4.2. Planta da Área 1 – Sítio Experimental de Geotecnia da UFPR.	98
Figura 4.3. Planta da Área 2 – Sítio Experimental de Geotecnia da UFPR.	99
Figura 4.4. Etapas dos trabalhos nos poços da Área 1.	106
Figura 4.5. Detalhes do terreno e coleta de blocos indeformados em poços da Área 1.	107
Figura 4.6. Características do terreno no Poço 4 da Área 1.	108
Figura 4.7. Feições do terreno em escavações do Sítio Experimental.....	109
Figura 4.8. Execução de sondagens <i>SPT</i> e <i>SPTT</i> no Sítio Experimental.	112
Figura 4.9. Dados das sondagens <i>SPT</i> e <i>SPTT</i> da Área 1.....	113
Figura 4.10. Perfil simplificado da Área 1 do Sítio Experimental.	114
Figura 4.11. Dados das sondagens <i>SPT</i> e <i>SPTT</i> da Área 2.....	120
Figura 4.12. Perfil simplificado da Área 2 do Sítio Experimental.	122
Figura 4.13. Profundidades do nível da coluna d’água nos piezômetros do Sítio Experimental.	125
Figura 4.14. Execução de ensaios de cone no Sítio Experimental.	127
Figura 4.15. Dados da sondagem CPTu-1 – Área 1.....	131
Figura 4.16. Dados da sondagem CPT-2 – Área 1.....	131
Figura 4.17. Dados da sondagem CPTu-3 – Área 1.....	132
Figura 4.18. Dados da sondagem CPTu-4 – Área 1.....	132
Figura 4.19. Dados da sondagem CPTu-5 – Área 1.....	133
Figura 4.20. Dados da sondagem CPTu-6 – Área 1.....	133
Figura 4.21. Dados da sondagem CPTu-7 – Área 1.....	134
Figura 4.22. Dados da sondagem CPTu-1 – Área 2.....	135
Figura 4.23. Dados da sondagem CPTu-2 – Área 2.....	135
Figura 4.24. Dados da sondagem CPTu-3 – Área 2.....	136
Figura 4.25. Dados da sondagem CPTu-4 – Área 2.....	136
Figura 4.26. Dados da sondagem CPTu-5 – Área 2.....	137
Figura 4.27. Dados da sondagem CPT-6 – Área 2.....	137
Figura 4.28. Dados da sondagem CPTu-7 – Área 2.....	138
Figura 4.29. Dados da sondagem CPTu-8 – Área 2.....	138
Figura 4.30. Medições de poro-pressão problemáticas em ensaios de piezocone.....	139
Figura 4.31. Relação entre a poro-pressão do <i>slot-filter</i> e q_c – sondagem CPTu-4 – Área 1.	139
Figura 4.32. Dados de resistência de ponta das sondagens <i>CPT</i> da Área 1.	141
Figura 4.33. Dados de resistência de ponta das sondagens <i>CPT</i> da Área 2.	142
Figura 4.34. Dados da razão de atrito – Área 2.....	144
Figura 4.35. Detalhe do equipamento e da execução de sondagem <i>DMT</i> na Área 1.	147
Figura 4.36. Pressões corrigidas P_0 e P_l das sondagens <i>DMT</i> -1 e <i>DMT</i> -2 – Área 1.....	148
Figura 4.37. Resultados das sondagens <i>DMT</i> -1 e <i>DMT</i> -2 – Área 1.	148
Figura 4.38. Execução de ensaios com pressômetro autoperfurante no Sítio Experimental.	152
Figura 4.39. Pressão × deslocamento – ensaio a 3,6 m de profundidade – furo SBP-1 da Área 1.....	161
Figura 4.40. Pressão × deslocamento – ensaio a 8,0 m de profundidade – furo SBP-1 da Área 1.....	161
Figura 4.41. Pressão × deslocamento – ensaio a 11,0 m de profundidade – furo SBP-1 da Área 1.....	162
Figura 4.42. Pressão × deslocamento – ensaio a 2,0 m de profundidade – furo SBP-1 da Área 2.....	162
Figura 4.43. Pressão × deslocamento – ensaio a 3,5 m de profundidade – furo SBP-1 da Área 2.....	163
Figura 4.44. Pressão × deslocamento – ensaio a 7,5 m de profundidade – furo SBP-1 da Área 2.....	163
Figura 4.45. Pressão × deslocamento – ensaio a 9,5 m de profundidade – furo SBP-1 da Área 2.....	164
Figura 4.46. Pressão × deslocamento – ensaio a 3,5 m de profundidade – furo SBP-2 da Área 2.....	164
Figura 4.47. Pressão × deslocamento – ensaio a 7,5 m de profundidade – furo SBP-2 da Área 2.....	165
Figura 4.48. Pressão × deslocamento – ensaio a 9,5 m de profundidade – furo SBP-2 da Área 2.....	165
Figura 4.49. Variação da poro-pressão nos ensaios com pressômetro autoperfurante.....	166
Figura 4.50. Variação do módulo cisalhante com a deformação de cavidade – furo SBP-1 da Área 1 (Sampaio Jr, 2002).....	167
Figura 4.51. Variação do módulo cisalhante com a deformação de cavidade – furo SBP-1 da Área 2 (Sampaio Jr, 2002).....	168

Figura 4.52. Variação do módulo cisalhante com a deformação de cavidade – furo SBP-2 da Área 2 (Sampaio Jr, 2002).....	169
Figura 4.53. Detalhe da implantação das estacas escavadas mecanicamente – Área 1.....	174
Figura 4.54. Curvas tensão × deformação de isopor classe P2, confinado por contorno metálico.....	182
Figura 4.55. Curvas tensão × deformação de cepo composto por pranchas de peroba (três ciclos)...	183
Figura 4.56. Perfuração e inspeção do fuste das estacas.....	186
Figura 4.57. Etapas da execução das estacas.....	190
Figura 4.58. Etapas complementares dos trabalhos no estaqueamento.....	193
Figura 4.59. Detalhes das provas de carga dinâmicas.....	196
Figura 4.60. Sinais de força e velocidade problemáticos – estaca BP-1B, golpe 7.....	200
Figura 4.61. Sinais de força e velocidade de estacas com 25 e 40 cm de diâmetro nominal.....	204
Figura 4.62. Sinais de força e velocidade de estacas com 40 cm de diâmetro nominal.....	205
Figura 4.63. Sinais de força e velocidade de estacas com 40 e 60 cm de diâmetro nominal.....	206
Figura 4.64. Sinais de força e velocidade de estacas com 60 cm de diâmetro nominal.....	207
Figura 4.65. Simulações estáticas do programa <i>CAPWAP</i> – estacas BP-1A, BP-1B e BP-1C.....	214
Figura 4.66. Simulações estáticas do programa <i>CAPWAP</i> – estaca BP-2A.....	214
Figura 4.67. Simulações estáticas do programa <i>CAPWAP</i> – estaca BP-2C.....	214
Figura 4.68. Simulações estáticas do programa <i>CAPWAP</i> – estacas BP-2B e BP-2D.....	214
Figura 4.69. Simulações estáticas do programa <i>CAPWAP</i> – estaca BP-3B.....	215
Figura 4.70. Simulações estáticas do programa <i>CAPWAP</i> – estaca BP-3C.....	215
Figura 4.71. Simulações estáticas do programa <i>CAPWAP</i> – estaca BP-3D.....	215
Figura 5.1. Difratoograma da matriz argilosa do bloco 2.0042.97.....	223
Figura 5.2. Difratoograma do material escuro raspado de fraturas do bloco 2.0042.97.....	223
Figura 5.3. Imagem (<i>MEV</i>) da matriz argilosa, ampliação 1000 × - amostra 2.0034.99.....	229
Figura 5.4. Imagem (<i>MEV</i>) da matriz argilosa, ampliação 4000 × - amostra 2.0034.99.....	229
Figura 5.5. Imagem (<i>MEV</i>) da matriz argilosa, ampliação 1000 × - amostra 2.0041.97.....	230
Figura 5.6. Imagem (<i>MEV</i>) da matriz argilosa, ampliação 4000 × - amostra 2.0041.97.....	230
Figura 5.7. Imagem (<i>MEV</i>) da matriz argilosa, ampliação 10000 × - amostra 2.0041.97.....	231
Figura 5.8. Imagem (<i>MEV</i>) de uma superfície polida, ampliação 100 × - amostra 2.0041.97.....	231
Figura 5.9. Imagem (<i>MEV</i>) da região assinalada na Figura 5.8, superfície polida, ampliação 1000 × - amostra 2.0041.97.....	232
Figura 5.10. Imagem (<i>MEV</i>) de uma superfície polida, ampliação 4000 × - amostra 2.0041.97.....	232
Figura 5.11. Imagem (<i>MEV</i>) de uma superfície polida coberta integralmente por manchas escuras, ampliação 40 × - amostra 2.0034.99.....	233
Figura 5.12. Imagem (<i>MEV</i>) de uma superfície polida coberta integralmente por manchas escuras, ampliação 40 × - amostra 2.0034.99.....	233
Figura 5.13. Análises de raio-X no microscópio eletrônico.....	234
Figura 5.14. Curvas granulométricas das amostras do Sítio Experimental.....	238
Figura 5.15. Posição dos solos do Sítio Experimental na Carta de Plasticidade.....	240
Figura 5.16. Influência do processo de secagem nas curvas granulométricas de solos da Área 1.....	244
Figura 5.17. Prensa utilizadas nos ensaios de adensamento: (a) <i>Contenco</i> ; (b) <i>Controls</i>	248
Figura 5.18. Curva $e \times \log$ pressão efetiva – amostra 4.0040.00 (indeformada).....	251
Figura 5.19. Curva $e \times \log$ pressão efetiva – amostra 4.0047.00 (indeformada).....	251
Figura 5.20. Curva $e \times \log$ pressão efetiva – amostra 4.0061.01 (indeformada).....	251
Figura 5.21. Curva $e \times \log$ pressão efetiva – amostra 4.0039.00 (indef., sentido vertical).....	252
Figura 5.22. Curva $e \times \log$ pressão efetiva – amostra 4.0039.00 (indef., sentido horiz. N-S).....	252
Figura 5.23. Curva $e \times \log$ pressão efetiva – amostra 4.0039.00 (indef., sentido horiz. E-W).....	252
Figura 5.24. Curva $e \times \log$ pressão efetiva – amostra 4.0050.00 (indeformada).....	253
Figura 5.25. Curva $e \times \log$ pressão efetiva – amostra 4.0040.00 (remoldada).....	253
Figura 5.26. Curva $e \times \log$ pressão efetiva – amostra 4.0050.00 (remoldada).....	253
Figura 5.27. Exemplos de curvas de adensamento de corpos de prova indeformados.....	256
Figura 5.28. Detalhes das determinações de sucção com papel filtro.....	262
Figura 5.29. Relações de sucção da amostra indeformada 4.0040.00.....	269
Figura 5.30. Relações de sucção da amostra indeformada 4.0047.00.....	270
Figura 5.31. Relações de sucção da amostra indeformada 4.0050.00.....	271
Figura 5.32. Relações de sucção (matricial e total) da amostra indeformada 4.0050.00.....	272
Figura 5.33. Relações de sucção da amostra indeformada 4.0050.01.....	273

Figura 5.34. Curva característica da amostra indeformada 4.0061.01.	274
Figura 5.35. Relações de sucção da amostra remoldada 4.0037.00.	275
Figura 5.36. Relações de sucção da amostra remoldada 4.0039.00.	276
Figura 5.37. Relações de sucção da amostra remoldada 4.0043.00.	277
Figura 5.38. Relações de sucção da amostra remoldada 4.0049.00.	278
Figura 5.39. Relações de sucção da amostra remoldada 4.0058.00.	279
Figura 5.40. Prensa de cisalhamento direto (<i>Contenco</i>) utilizada nos ensaios.	283
Figura 5.41. Evolução dos deslocamentos com o tempo nos ensaios de cisalhamento direto – amostra 4.0049.00.	286
Figura 5.42. Curvas tensão cisalhante × deslocamento – corpos de prova 50 x 50 mm – amostra 4.0049.00.	289
Figura 5.43. Variação de altura durante o ensaio – corpos de prova 50 x 50 mm – amostra 4.0049.00.	289
Figura 5.44. Curvas tensão cisalhante × deslocamento – corpos de prova 100 x 100 mm – amostra 4.0049.00.	290
Figura 5.45. Variação de altura durante o ensaio – corpos de prova 100 x 100 mm – amostra 4.0049.00.	290
Figura 5.46. Curvas tensão cisalhante × deslocamento – corpos de prova 50 x 50 mm – amostra 4.0061.01.	291
Figura 5.47. Variação de altura durante o ensaio – corpos de prova 50 x 50 mm – amostra 4.0061.01.	291
Figura 5.48. Curvas tensão cisalhante × deslocamento – corpos de prova 100 x 100 mm – amostra 4.0061.01.	292
Figura 5.49. Variação de altura durante o ensaio – corpos de prova 100 x 100 mm – amostra 4.0061.01.	292
Figura 5.50. Curvas tensão cisalhante × deslocamento – amostra reconstituída 4.0043.00.	293
Figura 5.51. Variação de altura durante o ensaio – amostra reconstituída 4.0043.00.	293
Figura 5.52. Corpo de prova 50 × 50 mm da amostra 4.0049.00, após o cisalhamento.	294
Figura 5.53. Envoltórias de resistência – amostra indeformada 4.0049.00.	294
Figura 5.54. Envoltórias de resistência – amostra indeformada 4.0061.01.	295
Figura 5.55. Envoltória de resistência de solo remoldado – amostra 4.0043.00.	295
Figura 5.56. Sistema <i>GDS</i> utilizado nos ensaios triaxiais.	298
Figura 5.57. Evolução da poro-pressão e da pressão de câmara durante a saturação.	306
Figura 5.58. Curvas de adensamento isotrópico.	307
Figura 5.59. Curvas tensão desviadora × deformação axial – ensaios <i>CIU</i>	308
Figura 5.60. Variação da poro-pressão com a deformação axial.	309
Figura 5.61. Trajetórias de tensão efetiva – ensaios <i>CIU</i>	310
Figura 5.62. Envoltórias de resistência dos ensaios <i>CIU</i>	311
Figura 5.63. Detalhe do aspecto de corpos de prova de 38 e 50 mm após os ensaios.	313
Figura 5.64. Detalhe do aspecto de corpos de prova de 50 e 70 mm após os ensaios.	314
Figura 6.1. Comparação entre as resistências de ponta (<i>CPT</i>) das duas áreas investigadas.	318
Figura 6.2. Relação entre q_c e N_{SPT} – argila siltosa do Sítio Experimental.	322
Figura 6.3. Relação entre q_c e N_{60} corrigido em função do comprimento das hastes (Skempton, 1986) – argila siltosa do Sítio Experimental.	322
Figura 6.4. Dados dos ensaios de cone da Área 1 no diagrama de Robertson et al. (1986).	326
Figura 6.5. Dados dos ensaios de cone da Área 1 agrupados por faixas de altitude.	326
Figura 6.6. Dados dos ensaios de cone da Área 2 no diagrama de Robertson et al. (1986).	327
Figura 6.7. Dados dos ensaios de cone da Área 2 agrupados por faixas de profundidade.	327
Figura 6.8. Relação $E_D \times I_D$ dos ensaios <i>DMT</i> da Área 1 (diagrama baseado em Marchetti e Crapps, 1981).	329
Figura 6.9. Variação de S_u no Sítio Experimental - pressômetro autoperfurante (dados de Sampaio Jr, 2002).	330
Figura 6.10. Relação entre S_u (pressômetro autoperfurante) e N_{SPT} – Áreas 1 e 2.	332
Figura 6.11. Relação entre S_u/N_{60} e <i>IP</i> para dados da literatura e do Sítio Experimental.	333
Figura 6.12. Relação entre $q_c - \sigma_v$ dos ensaios de cone e avaliações de S_u – Áreas 1 e 2.	335
Figura 6.13. Variação de N_K com a profundidade no Sítio Experimental (avaliações de S_u baseadas no método de Gibson e Anderson, 1961).	336

Figura 6.14. Relação entre N_K e IP para dados da literatura e do Sítio Experimental.	337
Figura 6.15. Variação da pressão de pré-adensamento e da razão de sobre-adensamento na Área 1 (método de Pacheco Silva).....	338
Figura 6.16. Parâmetros de deformabilidade (pressiômetro autoperfurante) para 0,1 % de deformação de cavidade (dados de Sampaio Jr, 2002).	341
Figura 6.17. Variação de K_0 com a profundidade no Sítio Experimental (dados de Sampaio Jr, 2002).	343
Figura 6.18. Relação entre o <i>quake</i> de ponta e a nega – estacas escavadas – Área 1.....	349
Figura 6.19. Parcelas de resistência das análises <i>CAPWAP</i> em função das negas.	351
Figura 6.20. Comparação dos resultados das provas de carga dinâmicas com estimativas de capacidade de suporte.	354
Figura 6.21. Parcelas de resistência unitárias – análises <i>CAPWAP</i>	357
Figura 6.22. Distribuição de propriedades índice no perfil da Área 1.....	360
Figura 6.23. Relação entre os limites de liquidez e plasticidade e o teor de argila – Área 1.....	362
Figura 6.24. Atividade dos solos do Sítio Experimental.	362
Figura 6.25. Variação do índice de atividade A com a profundidade – Área 1.	363
Figura 6.26. Curvas $e \times \log$ pressão efetiva – amostras indeformadas.....	366
Figura 6.27. Curvas $e \times \log$ pressão efetiva da amostra 4.0039.00, com diferentes sentidos de moldagem.....	366
Figura 6.28. Curvas características – amostras indeformadas da Área 1.	369
Figura 6.29. Relação entre grau de saturação e umidade, obtidas nas determinações de sucção dos corpos de prova indeformados.	370
Figura 6.30. Curvas $e \times \log$ pressão efetiva de solo remoldado – literatura e Sítio Experimental.	371
Figura 6.31. Comparação entre as curvas $e \times \log$ pressão efetiva e $e \times$ sucção – solo remoldado.	373
Figura 6.32. Curvas $e \times \log$ pressão efetiva – solo indeformado e remoldado.....	374
Figura 6.33. Curvas $e \times \log$ pressão efetiva – solo remoldado \times dados da literatura.	377
Figura 6.34. Relação entre LL e o índice de vazios na Formação Guabirota.	377
Figura 6.35. Relações entre I_v e a pressão efetiva - Formação Guabirota.	379
Figura 6.36. Relação entre cota e o parâmetro I_v na Formação Guabirota.	379
Figura 6.37. Ensaios de cisalhamento direto - curvas tensão tangencial \times deslocamento.....	381
Figura 6.38. Curvas tensão desviadora \times deformação dos ensaios triaxiais <i>CIU</i>	382
Figura 6.39. Variação de poro-pressão normalizada \times deformação axial.....	384
Figura 6.40. Variação do parâmetro A_f com a tensão efetiva inicial e o <i>OCR</i>	384
Figura 6.41. Trajetórias de tensão – ensaios triaxiais <i>CIU</i>	385
Figura 6.42. Curvas tensão desviadora normalizada \times deformação axial – ensaios triaxiais <i>CIU</i>	386
Figura 6.43. Relação entre a resistência não-drenada e a tensão efetiva inicial – ensaios triaxiais <i>CIU</i>	388
Figura 6.44. Relações entre S_u , tensão efetiva e <i>OCR</i> – ensaios triaxiais <i>CIU</i>	388
Figura 6.45. Envoltórias de resistência - ensaios triaxiais <i>CIU</i> com amostras de diferentes diâmetros – Área 1 do Sítio Experimental.....	388
Figura 6.46. Envoltórias de resistência – argilas da Formação Guabirota.	390

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1. Propriedades de sedimentos não intemperizados da Formação Guabirota.	35
Tabela 3.2. Propriedades de sedimentos intemperizados da Bacia Sedimentar de Curitiba.....	36
Tabela 3.3. Índices físicos e ensaios de expansão (Pereira, 1999).	42
Tabela 3.4. Comparação entre propriedades do <i>sabão de caboclo</i> e da argila de Londres.	69
Tabela 3.5. Estatística das soluções de fundação (Chamecki et al., 2001).....	86
Tabela 4.1. Dados dos poços de coleta de amostras do Sítio Experimental.	101
Tabela 4.2. Dados das sondagens <i>SPT</i> – Área 1.	112
Tabela 4.3. Dados das sondagens <i>SPTT</i> – Área 1.	113
Tabela 4.4. Dados das sondagens <i>SPT</i> – Área 2.	116
Tabela 4.5. Dados das sondagens <i>SPTT</i> – Área 2.	120
Tabela 4.6. Dados de instalação dos piezômetros do Sítio Experimental.	124
Tabela 4.7. Dados das sondagens <i>CPT</i> e <i>CPTU</i> – Área 1 e Área 2.	128
Tabela 4.8. Índices do ensaio dilatométrico.	145
Tabela 4.9. Informações dos ensaios dilatométricos da Área 1 do Sítio Experimental.....	147
Tabela 4.10. Dados dos ensaios com pressiómetro autoperfurante.	154
Tabela 4.11. Avaliação de K_0 com pressiómetro autoperfurante.	157
Tabela 4.12. Avaliações da resistência não-drenada dos ensaios com pressiómetro autoperfurante (Sampaio Jr, 2002).	159
Tabela 4.13. Características das estacas escavadas.	176
Tabela 4.14. Estimativas da capacidade de suporte das estacas.	179
Tabela 4.15. Dados da perfuração das estacas.	187
Tabela 4.16. Dados do concreto utilizado nas estacas.	191
Tabela 4.17. Informações da concretagem das estacas.	191
Tabela 4.18. Dados da geometria das estacas e posição da instrumentação.....	194
Tabela 4.19. Programa de ensaios dinâmicos.....	198
Tabela 4.20. Dados dos golpes das provas de carga dinâmicas.	201
Tabela 4.21. Determinações de peso específico das estacas.	203
Tabela 4.22. Resultados das análises <i>CAPWAP</i>	212
Tabela 5.1. Resumo das amostras e do programa de ensaios de laboratório.....	220
Tabela 5.2. Programa de ensaios de caracterização.	236
Tabela 5.3. Resultados dos ensaios de caracterização de amostras do Sítio Experimental.	237

Tabela 5.4. Dados estatísticos dos ensaios de caracterização da Área 1 (Poços 1, 2, 3, 4 e 5).....	239
Tabela 5.5. Influência do processo de secagem no limite de liquidez de solos da Formação Guabirota.....	241
Tabela 5.6. Influência do processo de secagem nos limites de consistência de amostras da Área 1..	242
Tabela 5.7. Resumo do programa de ensaios de adensamento com amostras da Área 1.	246
Tabela 5.8. Dados dos corpos de prova dos ensaios de adensamento.	250
Tabela 5.9. Resultados dos ensaios de adensamento.....	254
Tabela 5.10. Valores do coeficiente de adensamento – processo de Taylor – amostras indeformadas.	257
Tabela 5.11. Valores do coeficiente de adensamento – processo de Casagrande – amostras remoldadas.	257
Tabela 5.12. Resumo do programa de determinações de sucção com papel filtro.	260
Tabela 5.13. Dados dos corpos de prova utilizados nas medições de sucção.....	266
Tabela 5.14. Resumo do programa de ensaios de cisalhamento direto com amostras da Área 1.....	281
Tabela 5.15. Dados dos corpos de prova utilizados nos ensaios de cisalhamento direto.	284
Tabela 5.16. Resumo do programa de ensaios triaxiais <i>CIU</i> com amostras do Poço 5 - Área 1.....	297
Tabela 5.17. Dados dos corpos de prova utilizados nos ensaios triaxiais.	301
Tabela 5.18. Resultados dos ensaios triaxiais <i>CIU</i>	312
Tabela 6.1. Regiões do diagrama $q_c \times FR$ para classificação do tipo de solo (Robertson et al., 1986).	324
Tabela 6.2. Resultados das provas de carga dinâmicas - parcelas de resistência interpretadas.....	352
Tabela 6.3. Comparação entre propriedades índice médias da literatura e da Área 1 do Sítio Experimental.	364

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	– Associação Brasileira de Normas Técnicas
BP	– Estaca escavada mecanicamente
CAPWAP	– <i>Case Pile Wave Analysis Program</i>
CFA	– Estaca hélice-contínua
CIU	– Ensaio triaxial adensado isotropicamente não-drenado
CPT	– Ensaio de cone
CPTU	– Ensaio de cone com medida de poro-pressão
CRS	– Ensaio de adensamento com taxa de deformação constante
CSI	– Tensão de compressão individual dos sensores na estaca
CSX	– Tensão de compressão média na estaca no nível dos sensores
CTC	– Capacidade de troca catiônica
DMT	– Dilatômetro de Marchetti
DMX	– Deslocamento máximo da estaca no nível dos sensores
EM	– Módulo de elasticidade dinâmico
EMX	– Energia líquida transferida à estaca em um golpe
FR	– Razão de atrito no ensaio de cone
ICL	– Linha de compressão intrínseca
ISSMFE	– <i>Int. Society for Soil Mechanics and Foundation Engineering</i>
JC	– Fator de amortecimento no método <i>CASE</i>
JS	– <i>Damping</i> de Smith no fuste da estaca
JT	– <i>Damping</i> de Smith na ponta da estaca
LAME	– Laboratório de Materiais e Estruturas
log	– Logaritmo decimal
MBA	– <i>Multiple Blow Analysis</i>
MEV	– Microscopia eletrônica de varredura
MQno	– <i>Match quality</i> da análise <i>CAPWAP</i>
NBR	– Norma Brasileira
OCR	– Razão de sobre-adensamento ou de cedência
PDA	– <i>Pile Driving Analyzer</i> (Analisador da cravação de estacas)
PIEZ	– Piezômetro
PIT	– Ensaio de Integridade de Estacas
PL	– <i>Soil plug</i> do solo na ponta da estaca
QS	– <i>Quake</i> médio de fuste
QT	– <i>Quake</i> de ponta
RCSB	– <i>Rift Continental do Sudeste do Brasil</i>
RMX	– Resistência máxima mobilizada no método <i>CASE</i>
SBP	– Pressiômetro autoperfurante
SPT	– Sondagem a percussão
SPTT	– Sondagem a percussão com medida de torque
TG	– <i>Toe gap</i> da estaca
TSX	– Tensão de tração
UFPR	– Universidade Federal do Paraná
USP	– Universidade de São Paulo
UU	– Ensaio triaxial não-adensado e não-drenado
WS	– Velocidade de propagação de onda na estaca

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Índice de atividade
A_0	Dimensão de corpo de prova relacionada com efeitos de escala
A_f	Parâmetro de poro-pressão na ruptura
α	Relação entre o atrito lateral unitário e a resistência não-drenada
B	Parâmetro de poro-pressão – fase de saturação de ensaio triaxial
B_q	Parâmetro de poro-pressão no ensaio <i>CPTU</i>
C	Capacidade de sucção
c'	Intercepto coesivo da envoltória de resistência
C_c	Índice de compressão
C_c^*	C_c do solo remoldado, entre 100 e 1000 kPa tensão efetiva
C_r	Índice de recompressão
C_s	Índice de expansão
c_v	Coefficiente de adensamento
D_{50}	Diâmetro médio das partículas do solo
δ	Peso específico real dos grãos
E	Módulo de elasticidade
e	Índice de vazios
e_0	Índice de vazios inicial ou natural
e_{100}^*	Índice de vazios de solo remoldado sob 100 kPa de tensão efetiva
e_{1000}^*	Índice de vazios de solo remoldado sob 1000 kPa de tensão efetiva
E_D	Módulo dilatométrico
E_U	Módulo de elasticidade não-drenado
ε_c	Deformação de cavidade no ensaio pressiométrico
ε_f	Deformação correspondente à tensão cisalhante máxima no ensaio triaxial
f_{ck}	Resistência característica à compressão do concreto
f_s	Atrito lateral unitário de uma estaca
ϕ'	Ângulo de atrito efetivo
ϕ'_{00}	Ângulo de atrito efetivo interno mobilizado
ϕ_{res}	Ângulo de atrito residual
G	Módulo de cisalhamento
$G_{0,1}$	Módulo de cisalhamento corresponde a 0,1 % de deformação de cavidade
γ	Peso específico natural
γ_d	Peso específico seco
I_C	Índice de contração
I_D	Índice de material - dilatômetro de Marchetti
IP	Índice de plasticidade
I_V	Parâmetro <i>void index</i>
k	Coefficiente de permeabilidade
K	Fator de correlação entre os ensaios de cone e <i>SPT</i>
K_0	Coefficiente de empuxo no repouso

K_A	Coefficiente de empuxo ativo
K_D	Índice de tensão horizontal - dilatômetro de Marchetti
K_P	Coefficiente de empuxo passivo
L/c	Tempo de propagação da onda ao longo do comprimento de uma estaca
LC	Limite de contração
LL	Limite de liquidez
LP	Limite de plasticidade
N_{60}	Número de golpes do <i>SPT</i> correspondente à eficiência de 60 %
N_c	Fator de capacidade de suporte na ponta de uma estaca
N_K	Fator de capacidade de suporte no ensaio de cone
N_{SPT}	Número de golpes na sondagem <i>SPT</i>
OCR	Razão de cedência
p'	Semi-soma das tensões efetivas principais
p_k	Sucção matricial em uma amostra indeformada
P_l	Pressão limite no ensaio pressiométrico
q	Semi-diferença das tensões principais
q_b	Resistência de ponta unitária de uma estaca
q_c	Resistência de ponta do cone
q_T	Resistência de ponta corrigida do cone
R^2	Coefficiente de determinação
ρ	Massa específica do material de uma estaca
S	Grau de saturação
S_u	Resistência não-drenada
σ	Tensão total
σ'	Tensão efetiva
σ'_H	Tensão horizontal efetiva
σ_v	Tensão vertical total
σ'_V	Tensão vertical efetiva
σ'_{vm}	Tensão de cedência ou de pré-adensamento
σ'_0	Tensão efetiva inicial na fase de cisalhamento do ensaio triaxial
σ'_{1f}	Tensão efetiva axial na ruptura
σ'_{3f}	Tensão efetiva confinante na ruptura
T	Medida de torque no ensaio <i>SPTT</i>
t_{100}	Tempo correspondente ao término do adensamento primário
t_f	Tempo correspondente à ruptura em um ensaio de cisalhamento
τ	Tensão cisalhante
u	Poropressão
u_2	Poropressão medida na base do cone
u_f	Excesso de poropressão na ruptura
w	Teor de umidade gravimétrico
Z	Impedância de uma estaca