



Christiano Faria Teixeira

**Análise dos Recalques de um Aterro
Sobre Solos Muito Moles da Barra da Tijuca – RJ**

Tese de Doutorado

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio.

Orientador: Alberto S. F. J. Sayão
Co-Orientador: Sandro Salvador Sandroni

Rio de Janeiro
Junho de 2012



Christiano Faria Teixeira

**Análise dos Recalques de um Aterro
Sobre Solos Muito Moles da Barra da Tijuca - RJ**

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor 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.

Sérgio Augusto Barreto da Fontoura

Presidente

Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

Sandro Salvador Sandroni

Co-Orientador

GEOPROJETOS

José Tavares Araruna Junior

Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

Edgar Odebrecht

Universidade do Estado de Santa Catarina

Fernando Schnaid

Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. José Eugênio Leal

Coordenador Setorial do Centro

Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 11 de junho de 2012

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

Christiano Faria Teixeira

Graduou-se em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Minas Gerais em 2003. Concluiu o mestrado em 2006 pela PUC-Rio. Desenvolveu e coordenou projetos em diversas áreas da geotecnia.

Ficha Catalográfica

Teixeira, Christiano Faria

Análise dos Recalques de um Aterro Sobre Solos Muito Moles da Barra da Tijuca - RJ / Christiano Faria Teixeira; orientador: Alberto Sampaio Ferraz Jardim Sayão; co-orientador: Sandro Salvador Sandroni. - Rio de Janeiro: PUC, Departamento de Engenharia Civil, 2012.

v., 326 f.: il. ; 29,7 cm

Tese (Doutorado) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil.

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia Civil - Teses. 2. Solos Muito Moles 3. Análise de Recalques 4. Ensaios de Laboratório 5. Ensaios de Campo 6. Instrumentação Geotécnica de Campo I. Sayão, Alberto S. F. J. (Alberto Sayão). II. Sandroni, Sandro S. (Sandro Sandroni). III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. IV. Título

CDD: 624

Agradecimentos

A Deus, antes de tudo e por tudo.

A minha esposa, por me apoiar, incentivar e acreditar no meu trabalho e por ter tido paciência e sido compreensiva nesses anos em que abri mão da vida pessoal.

Aos meus pais, pelos apoio incondicional e amizade, que sempre pude contar.

Aos professores, orientadores e amigos Alberto Sayão e Sandro Sandroni, por todo apoio, mas principalmente por todo tempo dispensado em reuniões, que muito contribuíram na minha formação.

À Geoprojetos, na pessoa do Sandro, por ter concebido e viabilizado o trabalho. Nas pessoas da Renata e do Geraldo, que sempre fizeram o melhor em um projeto que era de meu interesse e por toda disposição em me ajudar.

À Engenheira Myriam (responsável pela obra), por ter permitido o meu livre acesso à obra e ter me cedido todas as informações necessárias para realização do trabalho.

À equipe técnica do laboratório de Mecânicas dos Solos da PUC-Rio, principalmente ao Amaury, por todo o apoio e aprendizado que recebi.

À Geoforma, na pessoa do Edgar, por ter cedido os amostradores *Shelbies*. Na pessoa do Fernando, por todos os cuidados tomados nas etapas de amostragem e realização dos ensaios.

A todos os professores da PUC-Rio, por todos os ensinamentos que me foram transmitidos.

À Secretária de Pós-Graduação, Rita, pela ajuda nos assuntos burocráticos.

A minha avó, *Lilia*, e a minha madrinha, *Dinh'Ada*, que nunca serão esquecidas (em memória) e que, tenho certeza, me olham de onde estão.

Aos amigos Thiago Pecin, Joabson, Acha, Zé (3º elemento), Diego Camisinha, Pantoja, Patrício, Diego Orlando e Bruno, pela amizade e companheirismo ao longo de toda a jornada.

Aos Guilherme e Fernando (Geomecânica); Muniz (Muniz e Spada); Rodrigo e Sant'Anna (Sondotécnica); Steffen (Vale), que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho.

Aos meus irmãos, Guilherme e Bernard, por toda cumplicidade.

Aos amigos da Geoestável, Carlos, Marcelo, Patrik e Gustavo, pela convivência sempre agradável.

À CAPES, ao CNPq e à Geoprojetos, pela ajuda financeira.

Resumo

Teixeira, Christiano Faria; Sayão, Alberto de Ferraz Sampaio Jardim (Orientador); Sandroni, Sandro Salvador (Co-orientador). **Análise dos Recalques de um Aterro Sobre Solos Muito Moles da Barra da Tijuca – RJ**. Rio de Janeiro, 2012. 326p. Tese de Doutorado – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Este trabalho contempla uma análise dos recalques de um aterro construído sobre um depósito de solos muito moles da Barra da Tijuca (Baixada de Jacarepaguá), que pertence a uma planície costeira do Rio de Janeiro (RJ). O perfil de solos muito moles de fundação possuía até 17 m de espessura, caracterizados pelo $N_{spt} = 0$. O aterro foi construído em etapas e os recalques foram acelerados com a instalação de drenos verticais pré-fabricados na fundação. A construção do aterro durou cerca de 1,5 ano e foi monitorada por meio de instrumentação geotécnica. Campanhas de ensaios de campo e laboratório foram realizadas para determinação das características geotécnicas dos solos. Dez amostras foram coletadas em dois furos verticais de duas localidades virgens do depósito. Para evitar o amolgamento, cada etapa do processo de amostragem, desde a coleta até a moldagem dos corpos de prova, foi conduzida tomando-se cuidados especiais. Os corpos de prova foram moldados nas condições indeformada (horizontal e vertical) e completamente amolgada. Os procedimentos de moldagem dos corpos de prova foram associados à excelente qualidade da maioria dos corpos de prova moldados e por isso foram descritos detalhadamente. Todas as conclusões do trabalho levaram em consideração apenas os resultados dos ensaios realizados com corpos de prova considerados de excelente qualidade. Os ensaios de campo foram realizados em furos adjacentes aos furos onde foram coletadas as amostras indeformadas e na mesma região em que foram instalados grupos de instrumentos geotécnicos. A análise dos resultados dos ensaios de campo e laboratório e dos registros da instrumentação revela a existência de dois horizontes de solos muito moles que exibem características distintas e são separados por uma lente de areia contínua. O solo do horizonte superior (até 5 m de profundidade), que provavelmente foi formado após um período geológico de descarregamento do horizonte inferior, é caracterizado pelas condições de baixas tensões efetivas. O solo do horizonte inferior também está sob baixas tensões efetivas, contudo com uma tensão de pré-

adensamento caracterizada pela diferença $\sigma'_p - \sigma'_{v0} \approx 25$ kPa (constante com a profundidade), a qual pode ser associada ao mecanismo de carregamento e descarregamento mecânico. Uma correlação entre OCR (obtidas em ensaios de adensamento) e a razão S_u/σ'_{v0} (obtidas de ensaios de palheta e CPTu) foi atualizada para os solos do depósito. A alta compressibilidade dos solos foi confirmada pelos dados da instrumentação do aterro que mostraram recalques superficiais da ordem de 50 % da espessura do aterro (4,5 m). Os valores de C_α/C_c para os solos do depósito foram superiores aos valores característicos da maioria dos solos que se tem registro. Relações práticas para descrever a permeabilidade dos solos foram atualizadas. Os coeficientes de adensamento dos solos foram determinados por diversas formas e os resultados dos mesmos, apesar de apresentarem grande variabilidade (até dez vezes), não mostraram tendência quando os valores de campo (ensaios e dados de instrumentação) e laboratório foram comparados. O amolgamento dos corpos de prova afetou as características de permeabilidade e compressibilidade (primária e secundária) dos solos de ambos horizontes, mas os efeitos do mesmo foram mais severos nos solos do horizonte inferior. Uma previsão numérica, na qual se adotou um modelo para solo mole com fluência e foram considerados os parâmetros de laboratório, superestimaram levemente os recalques do aterro com o tempo.

Palavras-chave:

Solos muito moles; análise dos recalques; ensaios de laboratório; ensaios de campo; instrumentação geotécnica de campo.

Abstract

Teixeira, Christiano Faria; Sayão, Alberto de Ferraz Sampaio Jardim (Advisor); Sandroni, Sandro Salvador (Co-advisor). **Settlement Analysis of an Embankment on Very Soft Soil in Barra da Tijuca - RJ**. Rio de Janeiro, 2012. 326p. DSc. Thesis – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

This work presents a settlement analysis of an embankment built on a very soft soil deposit in Barra da Tijuca (Baixada de Jacarepaguá), which is located in Rio de Janeiro's coast. The geotechnical profile shows a very soft soil with thickness reaching 17 m, with $N_{spt} = 0$. The embankment was built in stages and its settlements were accelerated with prefabricated drains. The construction lasted about 1,5 year and was monitored by means geotechnical instrumentation. Field and laboratory test programs were carried out to define the geotechnical characteristics of the soil. Ten samples were collected from two vertical boreholes before any loading was applied to the soil. To avoid disturbance, each stage of sample process, from sampling to specimen preparation, was conducted with special procedures. Tests have been carried out both in undisturbed (vertical and horizontal directions) and completely disturbed conditions. The specimen preparation procedures are described in detail. Conclusions considered only the results of tests conducted on specimens with excellent quality. The in-situ tests were performed in vertical boreholes next to boreholes where the undisturbed samples were collected and in the same location in which geotechnical instruments group were installed. The analysis of the field and laboratory tests and instrumentation data revealed the existence of two very soft soil layers exhibiting distinct characteristics which are separated by a continuous sand lens. The upper soil layer (from surface down to about 5 m depth), that was probably formed after an unloading geological period of the underlying layer, is characterized by low effective in situ stresses. The underlying soil is also under low in-situ effective stresses, but with a preconsolidation pressure characterized by the difference $\sigma'_p - \sigma'_{v0} \approx 25$ kPa (constant with depth). A correlation between OCR (from consolidation tests) and S_u/σ'_{v0} ratio (from vane and CPTU tests) for similar soils has been updated. The high compressibility of soils was confirmed by the

embankment instrumentation data. C_a/C_c values, higher than usual for most known soils, were found. Practical relationships have been updated to describe the permeability of the deposit. Soil consolidation coefficients were estimated in different ways and values, even though have showed large difference (up to ten times), did not showed tendency when laboratory or field (tests and instrumentation data) values were compared. Disturbance affected the permeability and compressibility (primary and secondary) characteristic of the soils of both layers, but its effects were more severe in the underlying layer. A numerical prediction, in which a creep-soft-soil model was used and parameters obtained from the laboratory tests were considered, lightly overestimated the embankment settlements with time.

Keywords:

Very soft soils; settlement analysis; laboratory tests; field tests; geotechnical field instrumentation.

Sumário

1. INTRODUÇÃO	26
1.1. Motivação	26
1.2. Objetivos	27
1.3. Metodologia	28
1.4. Estrutura	31
1.5. Fora do Escopo	32
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	34
2.1. Aterros Construídos Sobre Depósitos de Solos Moles	34
2.2. Ensaios de Laboratório	38
2.3. Ensaios de Campo	70
2.4. Análises de Registros de Campo (Instrumentação)	89
3. OBRA INSTRUMENTADA – ESTUDO DE CASO	96
3.1. Baixada de Jacarepaguá	96
3.2. Depósito de Solos Muito Moles - Sondagens do tipo SPT	102
3.3. Características do Aterro e de seu Projeto	105
3.4. Investigações e Monitoramentos de Campo	111
4. ENSAIOS DE LABORATÓRIO	118
4.1. Ensaios de Caracterização Completa	119
4.2. Ensaios de Adensamento	135
5. ENSAIOS DE CAMPO	164
5.1. Ensaios de Piezocone, <i>CPTu</i>	166

5.2.	Ensaio de Dissipação em Piezocone	175
5.3.	Ensaio de Permeabilidade em Piezômetros	178
5.4.	Ensaio de Palheta	181
6.	INSTRUMENTAÇÃO GEOTÉCNICA	189
6.1.	Placas de Recalque e Controle do Aterramento do Aterro	190
6.2.	Piezômetros	194
6.3.	Sensores Magnéticos ou Aranhas Magnéticas	199
6.4.	Inclinômetros	201
7.	ANÁLISE DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DOS DADOS DA INSTRUMENTAÇÃO	205
7.1.	Classificação dos Solos, Estratigrafia e Condições Iniciais do Subsolo	206
7.2.	História de Tensões do Depósito	214
7.3.	Compressão Primária	230
7.4.	Compressão Secundária	243
7.5.	Permeabilidade	254
7.6.	Coeficiente de Adensamento	267
8.	ANÁLISE NUMÉRICA DO COMPORTAMENTO DO ATERRO	285
8.1.	Ferramenta Numérica	286
8.2.	Dados de Entrada da Análise	288
8.3.	Resultados das Análises	297
8.4.	Avaliação da Análise Numérica	304
9.	CONCLUSÕES E SUGESTÕES	306
9.1.	Conclusões	307
9.2.	Sugestões	312
10.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	313

Índice de Figuras

Figura 2.1 – Equipamentos, sondas e técnicas de investigação geotécnica (Mayne, 2009).	38
Figura 2.2 – Esquema da trajetória de tensões durante os procedimentos de amostragem (adaptado de Ladd e DeGroot, 2003).	40
Figura 2.3 – Definição dos índices de compressão dos solos.	49
Figura 2.4 – Comparação das curvas $e\text{-log}\sigma'_v$ e $\log(v)\text{-log}\sigma'_v$ (adaptada de Butterfield, 1979).	50
Figura 2.5 – Efeito da compressão secundária na tensão de pré-adensamento (adaptada de Schmertman, 1983).	51
Figura 2.6 – Comparação entre as curva $e\text{-log}\sigma'_v$ de laboratório e de campo (adaptado de Coelho, 2000).	52
Figura 2.7 – Influência da velocidade de deformação nos resultados de ensaios de adensamento e determinações de σ'_p .	55
Figura 2.8 – Comportamento do solo sob carregamento com o tempo (Mesri, 1987).	57
Figura 2.9 – Comparação entre teorias de compressão secundária [Hight et al (1987), adaptada de Coelho (2000)].	60
Figura 2.10 - Modelo reológico sugerido para argilas naturais (Leroueil et al, 1985).	62
Figura 2.11- Variação de c_v durante um incremento de carga – $\sigma'_v > \sigma'_p$ – do ensaio convencional (Tavenas et al, 1983).	64
Figura 2.12 – Comportamento típico de c_v (ou c_h) de argilas sob compressão.	65
Figura 2.13 – Dados de anisotropia de permeabilidade e da variação desta com o índice vazios.	68
Figura 2.14- Comparação de medidas diretas e indiretas da permeabilidade de uma argila natural (Tavenas et al, 1983-a).	68
Figura 2.15 – Dados das: (a) relação c_k vs e_o e (b) posição relativa da curva $e\text{-log}k$.	70
Figura 2.16 – Gráfico Q_{t1} vs F_r , com os contornos do Índice de Comportamento do Solo, I_c , (adaptado de Robertson, 2009-b).	74
Figura 2.17 – Relação entre S_u/σ'_{v0} com OCR (Jamiolkowski et al, 1985).	77
Figura 2.18 – Relações entre OCR (ensaio oedométrico) vs Q_t (cone) de argilas.	78

Figura 2.19 – Valores do fator de cone em depósitos de solos moles da Barra da Tijuca – RJ (Almeida et al, 2010).....	78
Figura 2.20 – Efeito da velocidade com que é realizado um ensaio na medida da resistência do solo.	81
Figura 2.21 – Determinação da permeabilidade do solo in situ a partir de ensaios em piezômetros do tipo Casagrande.	83
Figura 2.22 – Comparação entre excesso de poro-pressões estimados e medidos (Levadoux e Baligh, 1980).	85
Figura 2.23 – Comparação entre previsão e medidas de dissipação de excessos de poro-pressão na base do cone (Baligh e Levadoux, 1986).	86
Figura 2.24 – Distribuição do excesso de poro-pressão ao redor do piezocone – Teh (1987).	88
Figura 2.25 – Métodos de correção da curva de dissipação – piezocone (adaptados de Sully e Campanella, 1994).	88
Figura 2.26 – Representação gráfica dos recalques para aplicação do método de Asaoka (adaptado de Asaoka, 1978).	92
Figura 2.27 – Representações gráficas variadas (Schmidt, 1992).	92
Figura 2.28 – Processo de previsão (Lambe, 1973).....	93
Figura 2.29 – Registros de campo vs previsão numérica de uma escavação (adaptado de Nogueira et al, 2011).....	94
Figura 2.30 – Efeito da variação de k nos resultados dos excessos de poro-pressão e recalque (Huang et al, 2006).	95
Figura 3.1 – Limites da baixada de Jacarepaguá em relação aos limites da cidade do Rio de Janeiro (Google Earth).	97
Figura 3.2 – Área de implantação do aterro instrumentado em relação aos limites da baixada de Jacarepaguá (Google Earth).	97
Figura 3.3 – Vistas aéreas da área de estudo.....	98
Figura 3.4 – Mapa altimétrico e viário do Rio de Janeiro (2004). Fonte: IPP – Diretoria de Informações Geográficas.	99
Figura 3.5 – Mapa geológico do Rio de Janeiro (2004). Fonte: IPP – Diretoria de Informações Geográficas.	100
Figura 3.6 – Mapa geológico do Rio de Janeiro (2000). Fonte: CPRM – Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais.....	100
Figura 3.7 – Mapa de localização das sondagens do tipo SPT.....	102
Figura 3.8 – Perfil geológico-geotécnico na direção do eixo do aterro...	107
Figura 3.9 – Perfil geológico-geotécnico – seção transversal Est. 62+10.	108
Figura 3.10 – Geometria do aterro.	109
Figura 3.11 – Detalhes da implantação dos drenos verticais e dos instrumentos geotécnicos.....	110

Figura 3.12 – Vista da obra – etapa de cravação dos drenos verticais..	110
Figura 3.13 – Detalhe da geometria final do aterro.	111
Figura 3.14 – Sistema de cravação leve do CPTu – equipamento da Geoforma.	113
Figura 4.1 – Teores de umidade dos solos – 1ª e 2ª etapas de ensaios.....	123
Figura 4.2 – Curvas granulométricas dos solos – 2ª etapa de ensaios..	127
Figura 4.3 – Limites de consistência dos solos.	129
Figura 4.4 – Perdas por ignição (PPI) dos solos.	133
Figura 4.5 – Prensa de adensamento do tipo Bishop – LGMA (PUC-Rio).....	137
Figura 4.6 – Prensa para ensaios de adensamento do tipo CRS – LGMA (PUC-Rio).....	138
Figura 4.7 – Processo de extração da amostra do tubo amostrador.....	143
Figura 4.8 – Posição de moldagem dos corpos de prova em relação à orientação da amostra.....	144
Figura 4.9 – Detalhes do procedimento de moldagem de um CP na direção vertical.	147
Figura 4.10 – Sequência de moldagem dos corpos de prova amolgados.....	149
Figura 4.11 – Detalhes do procedimento de moldagem dos CP's – ensaios CRS.	150
Figura 4.12 – Curvas de compressão dos ensaios incrementais realizados com CP's moldados na direção horizontal – EMI-62 (AM.705).....	152
Figura 4.13 – Curvas de compressão dos ensaios incrementais realizados com CP's moldados na direção horizontal – EMI-71 (AM.703).....	153
Figura 4.14 – Curvas de compressão dos ensaios incrementais realizados com CP's moldados na direção vertical.	154
Figura 4.15 – Curvas de compressão dos ensaios incrementais realizados com CP's amolgados.	155
Figura 4.16 – Curvas de compressão dos ensaios do tipo CRS realizados com CP's amolgados.	157
Figura 4.17 – Curvas de compressão dos ensaios de adensamento convencionais.....	158
Figura 4.18 – Teores de umidade dos solos das amostras deformadas e indeformadas medidos ao longo do tempo.	162
Figura 5.1 – Resultados diretos do ensaio de piezocone realizado na EMI 62 (705).....	170

Figura 5.2 – Resultados indiretos do ensaio de piezocone realizado na EMI-62 (705).	171
Figura 5.3 – Resultados diretos do ensaio de piezocone realizado na EMI-71 (703).	172
Figura 5.4 – Resultados indiretos do ensaio de piezocone realizado na EMI-71 (703).	173
Figura 5.5 – Curvas do ensaio de dissipação de poro-pressão, u_2 , no piezocone.	176
Figura 5.6 – Diagramas de equalização - EMI-62 (705).	180
Figura 5.7 – Características típicas da palheta utilizadas nos ensaios de campo.	182
Figura 5.8 – Variação da resistência não drenada, S_u e S_{ur} , com a profundidade – ensaios de palheta.	183
Figura 5.9 – Curvas S_u versus rotação angular.	187
Figura 5.10 – Avaliação de N_{kt}	188
Figura 6.1 – Detalhes da placa de recalque.	191
Figura 6.2 – Seqüência executiva do aterro - placa de recalque: PR-21.	193
Figura 6.3 – Detalhes dos tubos piezométricos.	195
Figura 6.4 – Registros dos excessos de poro-pressão nos piezômetros de Casagrande.	196
Figura 6.5 – Detalhes dos sensores magnéticos.	200
Figura 6.6 – Registros dos recalques na EMI-62.	200
Figura 6.7 – Detalhes dos tubos inclinométricos - Geoprojetos.	202
Figura 6.8 – Registros dos deslocamentos horizontais.	203
Figura 7.1 – Perfis estratigráficos gerado com base nos dados do CPTu – metodologia proposta por (Robertson, 1990).	208
Figura 7.2 – Características e classificações dos solos.	211
Figura 7.3 – Classificação dos solos – Carta de Plasticidade de Casagrande.	212
Figura 7.4 – Avaliação indireta dos tipos de minerais argílicos presentes nos solos em estudo.	214
Figura 7.5 – Determinação de σ'_p por diversos métodos.	217
Figura 7.6 – História de tensões do depósito de solos muito moles da Barra da Tijuca.	222
Figura 7.7 – Relação entre S_u/σ'_{v0} (palheta) e OCR (adensamento incremental).	225
Figura 7.8 - Razão de resistência não drenada de pico, S_u/σ'_{v0} , versus profundidade.	226

Figura 7.9 – Relação entre $(q_t - \sigma_{v0})$ e σ'_p com base em dados do piezocone.	229
Figura 7.10 – Comparação entre OCR obtido no campo (CPTu) e no laboratório (ensaio IL ²⁴).	229
Figura 7.11 – Comparação das curvas ε_v -log σ'_v obtidas a partir dos ensaios de adensamento convencionais e CRS.	231
Figura 7.12 – Variação do coeficiente de deformação volumétrica, m_v , com os incrementos de tensões efetivas verticais, $\Delta\sigma'_v$	233
Figura 7.13 – Variação do coeficiente de deformação volumétrica com o incremento de carga dos solos indeformados e amolgados.	237
Figura 7.14 – Curvas da deformação volumétrica versus tensão efetiva.	238
Figura 7.15 – Valores dos índices de compressão dos ensaios de adensamento.	242
Figura 7.16 – Compressão secundária da AM.705-2,7 – $\sigma'_v/\sigma'_p \approx 80$	244
Figura 7.17 - Compressão secundária da AM.705-2,7 – $\sigma'_v/\sigma'_p \approx 1$	245
Figura 7.18 - Evolução de $C_\alpha/(1+e_0)$ e $C_\sigma/(1+e_0)$ com nível de tensão efetiva vertical.	247
Figura 7.19 – Determinação da relação C_α/C_c	250
Figura 7.20 – Variação do coeficiente de permeabilidade (k_v) com σ'_v	255
Figura 7.21 – Evolução dos coeficientes de permeabilidade verticais, horizontais e amolgados com σ'_v	257
Figura 7.22 – Coeficiente de permeabilidade versus volume específico ($v = 1+e$).	260
Figura 7.23 – Variação da permeabilidade com o índice de vazios.	260
Figura 7.24 – Razão de anisotropia de permeabilidade versus índice de vazios dos solos.	263
Figura 7.25 - Evolução típica de c_v com σ'_v	268
Figura 7.26 – Variação de m_v , k_v e c_v com σ'_v - AM.705-10,7.	269
Figura 7.27 – Evolução do coeficiente de adensamento com o nível de carregamento.	270
Figura 7.28 – Variação do coeficiente de adensamento com a tensão efetiva vertical (ensaio de adensamento).	271
Figura 7.29 – Relação de c_h/c_v versus σ'_v	273
Figura 7.30 – Curvas corrigidas de dissipação dos excessos de poropressão em CPTu.	276
Figura 7.31 – Curvas teóricas e experimental – ensaio EMI-62-10,7 (705)	277

Figura 7.32 – Representação gráfica de Asaoka para os dados da placa de recalque PR-21.....	280
Figura 7.33 – Coeficiente de adensamento versus c_h/c_v – dados de recalque.....	283
Figura 8.1 – Modelo geométrico.....	289
Figura 8.2 – Malha de elementos finitos.....	296
Figura 8.3 – Tensões decorrente do carregamento em faixa.....	298
Figura 8.4 – Alívio de tensões no subsolo.....	299
Figura 8.5 – Evolução dos recalques do aterro (PR-21).	300
Figura 8.6 – Linhas de mesmo recalque.	301
Figura 8.7 – Evolução das poro-pressões.....	302
Figura 8.8 – Deslocamentos laterais – IN.62-15 (IN.01).	304

Índice de Tabelas

Tabela 2.1 – Parâmetros que caracterizam o comportamento de solos moles (adaptado de Ladd e DeGroot, 2003).	35
Tabela 2.2 – Vantagens e limitações de ensaios de laboratório e campo (adaptado de Jamiolkowski et al, 1985).	36
Tabela 2.3 – Critério de Lunne et al (1997) para classificação da qualidade de “corpos de prova”.	43
Tabela 2.4 – Critério de Coutinho et al (2002) para classificação da qualidade de “corpos de prova” – realidade brasileira.	43
Tabela 2.5 – Anisotropia típica de argilas moles no campo (Jamiolkowski et al, 1985).	67
Tabela 2.6– Classificação dos solos nas 9 regiões do gráfico Q_{t1} vs F_r - (adaptado de Robertson, 1990).	74
Tabela 2.7 – Fator Tempo, T^* (adaptada de Teh, 1987)	87
Tabela 3.1 – Determinação da profundidade do depósito de solos moles.	103
Tabela 3.2 – Dimensões e relações geométricas dos amostradores.	115
Tabela 4.1 – Resumo dos índices físicos dos solos muito moles – 2ª etapa de ensaios.	126
Tabela 4.2 – Dados dos ensaios do tipo CRS.	140
Tabela 4.3 – Avaliação da qualidade das amostras.	160
Tabela 5.1 - Ângulos de rotação da palheta durante a execução dos ensaios.	185
Tabela 7.1 – Dados da avaliação dos procedimentos de classificação dos solos.	210
Tabela 7.2 – Atividade máxima de argilas do Rio de Janeiro (dados obtidos em Campos, 2006).	214
Tabela 7.3 – Valores das tensões de pré-adensamento – ensaios incrementais.	218
Tabela 7.4 – Valores das tensões de pré-adensamento – ensaios CRS.	218
Tabela 7.5 – Comparação entre σ'_p obtida nos ensaios de adensamento convencionais e do tipo CRS.	219
Tabela 7.6 – Tensão efetiva vertical de campo.	220
Tabela 7.7 – Índice de compressão de algumas argilas moles brasileiras.	243

Tabela 7.8 – Valores de C_α/C_c para os solos dos depósitos da Barra da Tijuca.....	251
Tabela 7.9 – Relação C_α/C_c dos solos amolgados.....	252
Tabela 7.10 – Coeficientes de determinação da deformação secundária.....	253
Tabela 7.11 – Valores representativos da permeabilidade dos solos.	262
Tabela 7.12 – Comparação entre coeficiente de permeabilidade de campo e laboratório.....	266
Tabela 7.13 – Coeficientes de adensamento dos solos – ensaios de adensamento incrementais.	270
Tabela 7.14 – Valores de c_h^{misto}	274
Tabela 7.15 – Coeficiente de adensamento, c_h – ensaios de dissipação em piezocone.....	277
Tabela 7.16 – Dados da avaliação da resistência ao fluxo do dreno.	281
Tabela 7.17 – Relações para determinação do d_s ou A_s durante a cravação do dreno.....	282
Tabela 7.18 – Dados para determinação de c_h (PR-21) – Método de Asaoka.	283
Tabela 7.19 – Valores de c_h obtidos por diversos métodos.....	284
Tabela 8.1 – Classificação de previsões (adaptado de Lambe, 1973)...286	
Tabela 8.2 – Períodos de carregamento.	290
Tabela 8.3 – Parâmetros dos solos.....	294

Lista de Símbolos

Romanos

A_{placa}	Área da placa – drenos aceleradores de recalque
A_s	Área amolgada do solo – devido à cravação dos drenos
A_t	Atividade de argila
a	Fator geométrico do cone – relação entre área
a_v	Coeficiente de compressibilidade
B	Diâmetro do furo – ensaio de palheta
B_q	Razão de poro-pressão – ensaio de piezocone
C_α	Coeficiente de compressão secundária
C_c	Índice de compressão do solo
C_r	Índice de recompressão do solo
C_s	Índice de expansibilidade
C_k	Coeficiente que relaciona a variação de k com e do solo
c'	Intercepto coesivo efetivo
c_a	Coeficiente de adensamento – solo amolgado
c_h^{misto}	Coeficiente de adensamento misto – campo e laboratório
c_h	Coeficiente de adensamento - horizontal
c_v	Coeficiente de adensamento - vertical
c_u	Resistência não drenada do solo
D	Diâmetro do bulbo de areia – geometria do piezômetro
D	Diâmetro da palheta – ensaio de palheta
d	Diâmetro do tubo piezométrico
d	Diâmetro do piezocone
d	Profundidade de inserção da palheta – ensaio de palheta
d_e	Diâmetro de influência do dreno
d_e	Diâmetro externo da haste – ensaio de palheta
d_i	Diâmetro interno da haste – ensaio de palheta

d_m	Diâmetro fictício da placa – drenos aceleradores de recalque
d_s	Diâmetro amolgado do dreno
d_w	Diâmetro efetivo do dreno
e	Espessura da palheta
e	Índice de vazios
e_0	Índice de vazios inicial
E	Módulo de Young
E_u	Módulo de Young não drenado
FA	Percentual de partículas de argila no solo
F_n	Função que relaciona diâmetros de influência e efetivo de um dreno
F_r	Atrito da luva do cone normalizado
f_s	Atrito da luva do cone
G	Módulo cisalhante do aço
G	Módulo cisalhante do solo
G_s	Densidade real dos grãos
h_0	Altura inicial do corpo de prova
H	Altura do corpo de prova
H	Altura da palheta
H	Horizontal
H_d	Distância de drenagem
$H_{máxima}$	Altura do corpo de prova no início do carregamento
$H_{mínima}$	Altura do corpo de prova no final do carregamento
$H_{médio}$	Altura média do corpo de prova durante um incremento de carga
I_c	Índice de comportamento do solo
I_r	Índice de rigidez do solo
IL	Carga Incremental
IP	Índice de plasticidade
J	Momento de inércia
L	Altura do bulbo de areia – geometria do piezômetro
L	Comprimento da composição da haste – ensaio de palheta
LL	Limite de liquidez
LP	Limite de plasticidade
l	Maior caminho de drenagem pelo comprimento do dreno

M	Relação entre p' e q
M	Torque máximo – ensaio de palheta
m	Expoente que relaciona OCR e a razão de resistência não drenada
m	Razão de transformação – interpretação dos dados piezométricos
m_v	Coeficiente de deformação volumétrica
MO	Teor de matéria orgânica
n	Relação entre diâmetros de influência e efetivo de um dreno
n	Expoente de tensão, dependente do tipo de solo
N_c	Fator de resistência do cone - teórico
N_{spt}	Número de golpes – ensaio do tipo SPT
N_{kt}	Fator de resistência do cone - empírico
OCR	Razão de sobre-adensamento
p'	Tensão normal efetiva média (Lambe)
P	Carga aplicada nos ensaios de adensamento
Pa	Pressão atmosférica
PPI	Perda por ignição
Q_{tl}	Resistência de ponta do cone normalizada – ensaio de cone
Q_{tm}	Resistência de ponta do cone normalizada – ensaio de cone
q	Tensão desviadora
q_c	Resistência de ponta do cone
q_t	Resistência de ponta do cone corrigida – ensaio de cone
q_w	Capacidade de vazão do dreno
R	Raio do cone (equipamento)
R_f	Razão de atrito da luva – ensaio de piezocone
r_m	Raio fictício da placa – drenos aceleradores de recalque
r_s	Raio amolgado do dreno
r_k	Anisotropia de permeabilidade
r_{k0}	Anisotropia de permeabilidade inicial
S_u	Resistência não drenada
S_u^{CPTu}	Resistência não drenada – ensaios de piezocone
S_u^{VT}	Resistência não drenada – ensaios de palheta
S_{uh}	Resistência não drenada horizontal
S_{ur}	Resistência não drenada residual

S_{uv}	Resistência não drenada vertical
S_{vt}	Resistência não drenada para $OCR = 1$ – ensaio de palheta
s	Relação entre diâmetros amolgado e efetivo de um dreno
T	Fator tempo
T	Tempo de retardo básico
T^*	Fator tempo modificado – interpretação dos dados de dissipação
t	Tempo
t_{100}	Tempo para ocorrência do adensamento primário
t_p	Tempo para ocorrência do adensamento primário
U	Excesso de poro-pressão normalizado
$U_{v,h}$	Grau de adensamento – problema com drenagem combinada
u_0	Poro-pressão estática de campo
u_2	Poro-pressão na base do cone – ensaios de piezocone
u_b	Poro-pressão na base do corpo de prova – ensaios do tipo CRS
u_i	Poro-pressão inicial na base do cone (CPTu)
u_s	Poro-pressão induzida por cisalhamento
u_t	Poro-pressão no tempo t na base do cone (CPTu)
V	Vertical
v	Volume específico do solo
W	Resistência ao fluxo do dreno
w	Teor de umidade do solo
k	Coeficiente de permeabilidade
k	Fator de correlação empírico – ensaio de piezocone
k_0	Coeficiente de permeabilidade inicial
K_0	Coeficiente de empuxo no repouso
k_h	Coeficiente de permeabilidade horizontal
$k_h^{in-situ}$	Coeficiente de permeabilidade determinado no campo
k_h^{lab}	Coeficiente de permeabilidade determinado no laboratório
k_{h0}	Coeficiente de permeabilidade horizontal para e_0
k_v	Coeficiente de permeabilidade vertical
k_{v0}	Coeficiente de permeabilidade vertical para e_0

Gregos

α_f	Parâmetro que caracteriza a rugosidade do cone – entre 0 e 1
------------	--------------------------------------------------------------

α_s	Parâmetro que caracteriza a rugosidade da luva – entre 0 e 1
β	Coeficiente angular – método de Asaoka
Δ	Fator de tensão – avaliação resultados dos ensaios de cone
Δe	Variação do índice de vazios
Δh	Variação de altura do corpo de prova
ΔP	Diferença de carga aplicada nos ensaios de adensamento
Δu	Incremento de poro-pressão
Δu_i	Excesso de poro-pressão inicial na base do cone (CPTu)
Δu_{2i}	Excesso de poro-pressão inicial na base do cone (CPTu)
Δu_t	Excesso de poro-pressão no tempo t na base do cone (CPTu)
Δu_{2t}	Excesso de poro-pressão no tempo t na base do cone (CPTu)
ΔW	Trabalho acumulado
ε	Deformação por adensamento
ε_v	Deformação vertical – ensaio de adensamento oedométrico
ε_v	Deformação volumétrica
ε_{v0}	Deformação volumétrica inicial
ϕ'	Ângulo de rotação relacionado ao atrito da haste – ensaio de palheta
ϕ'	Ângulo de atrito efetivo do solo
γ	Peso específico dos solos
γ_{aterro}	Peso específico dos solos do aterro
γ_{nat}	Peso específico natural dos solos
γ_{sat}	Peso específico saturado dos solos
γ_w	Peso específico da água
λ^*	Coeficiente de compressão modificado - Plaxis
μ^*	Coeficiente de compressão secundária modificado - Plaxis
ν	Coeficiente de Poisson
ρ	Recalque no tempo t
ρ_f	Recalque final
ρ_n	Recalque no tempo n – tempo em escala discreta (Asaoka)
ρ_{n+1}	Recalque no tempo n + 1 – tempo em escala discreta (Asaoka)
σ'_{ct}	Tensão pré-adensamento de campo – solo isento de amolgamento

σ_v	Tensão total vertical
σ_{v0}	Tensão vertical de campo
σ'_v	Tensão efetiva vertical
σ'_{v0}	Tensão efetiva vertical de campo
σ'_{vi}	Tensão de adensamento para qual ocorre a compressão secundária
σ'_{vs}	Tensão de pré-adensamento devido à compressão secundária
σ'_p	Tensão de pré-adensamento
$(\sigma'_p)^h$	Tensão de pré-adensamento – corpo de prova direção horizontal
$(\sigma'_p)^v$	Tensão de pré-adensamento – corpo de prova direção vertical
σ'_t	Tensão para a qual a estrutura do solo é destruída completamente
ψ	Coeficiente de dilatação do solo
κ^*	Coeficiente de recompressão modificado - Plaxis