

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA
DO RIO DE JANEIRO



Fernando Duarte Azevedo

**Recalques do Depósito de Solos
Moles de Cambinhas, RJ**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil do Departamento de Engenharia Civil PUC-Rio.

Orientador: Alberto de Sampaio Ferraz Jardim Sayão
Co-orientador: Sandro Salvador Sandroni

Rio de Janeiro
Março de 2015



Fernando Duarte Azevedo

**Recalques do Depósito de Solos
Moles de Cambinhas, RJ**

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

Prof. Alberto de Sampaio Ferraz Jardim Sayão

Orientador

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Prof. Sandro Salvador Sandroni

Co-orientador

SEA – Sandro Sandroni Engenheiros Associados Ltda

Prof. José Tavares Araruna Júnior

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Prof. Edgar Odebrecht

Universidade do Estado de Santa Catarina

Prof. Roberto Francisco de Azevedo

Universidade Federal de Viçosa

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do

Centro Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 11 de Março de 2015

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

Fernando Duarte Azevedo

Graduou-se em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, em julho de 2010. Ingressou no mestrado na PUC-Rio em março de 2013, desenvolvendo dissertação na linha de pesquisa de Geotecnia Experimental.

Ficha Catalográfica

Azevedo, Fernando Duarte

Recalques do Depósito de Solos Moles de Cambiomas, RJ / Fernando Duarte Azevedo; orientador: Alberto de Sampaio Ferraz Jardim Sayão; co-orientador: Sandro Salvador Sandroni. – Rio de Janeiro: PUC-Rio, Departamento de Engenharia Civil, 2015.

1.1. v., 144 f.: il. ; 30 cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil, 2015.

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia Civil – Teses. 2. Monitoramento de recalques. 3. Solos moles. 4. Ensaios de campo. 5. Ensaios de laboratório. 6. Compressão secundária. I Sayão, Alberto de Sampaio Ferraz Jardim. II Sandroni, Sandro Salvador. III Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. IV Título.

CDD: 624

A meus pais.

Agradecimentos

À PUC-Rio, pela oportunidade de fazer o Mestrado.

Ao CNPq, pelo apoio financeiro.

Aos Professores Alberto Sayão e Sandro Sandroni, pelos ensinamentos e pela orientação neste trabalho.

Ao amigo Michel Tassi, pelo apoio ao longo dos meses desta pesquisa.

Ao Eng. Divalter, da Geoprojetos, pelo auxílio nos trabalhos de campo.

Ao Eng. Edgar Odebrecht e demais colaboradores da empresa Geoforma, pela extração das amostras *Shelby* e pela realização dos ensaios de campo.

Aos Engs. Paulo Henrique Dias e Tiago Proto e demais colaboradores da empresa Seel, pela instalação do *benchmark*, em Camboinhas.

Ao IME-RJ, pelo empréstimo do equipamento utilizado nas medições de recalque.

À Eng. Marilene Ramos, por possibilitar o acesso ao local onde foram realizadas as medições, enquanto presidente do INEA-RJ.

Aos demais professores e funcionários do Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio, pelos ensinamentos e apoio ao longo do curso.

A toda equipe do Laboratório de Geotecnia da PUC-Rio – Edson, Amaury, Josué e Carlos – pelo suporte nos ensaios de laboratório e pela boa convivência.

Aos meus pais, Professores Izabel Duarte e Roberto Azevedo, pelas críticas e sugestões e pelo suporte incondicional em todo este período.

À minha família, que teve paciência para entender a minha ausência em momentos importantes.

À minha Bruna Martini, pelo apoio nos momentos difíceis, sempre me incentivando.

Aos irmãos que fiz na PUC, Adriano Malko e Nathália Louzada, pela amizade e convivência ao longo destes dois anos.

Aos amigos do Futsal dos Mestres e da Geotecnia da PUC-Rio, pela amizade.

À amiga Andrea Vecci, por ter me ajudado de forma tão importante em um momento difícil durante a pesquisa.

À Professora Ângela Pasture e demais amigos do Francês 2, pelo convívio, debates e mensagens que me foram passadas.

A todos os amigos de Viçosa (Coluni, Civil 2005 e Acamari), pela amizade e incentivo.

Foram exatamente dois anos de mestrado (primeira aula no dia 11/03/2013 e defesa no dia 11/03/2015), que culminaram na realização deste trabalho e num crescimento pessoal imenso. Dedico-o a todos vocês.

Resumo

Azevedo, Fernando Duarte; Sayão, Alberto de Sampaio Ferraz Jardim (Orientador); Sandroni, Sandro Salvador (Co-orientador). **Recalques do Depósito de Solos Moles de Camboinhas, RJ**. Rio de Janeiro, 2015. 144 p. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O acompanhamento dos recalques de aterros, por meio de nivelamento topográfico periódico, permite estimar a evolução dos mesmos, bem como retroanalisar os parâmetros adotados em determinado projeto. Neste trabalho, recalques foram medidos em um aterro experimental sobre um depósito com 12 m de espessura de solos moles em Camboinhas, Niteroi (RJ), construído entre o final de 1977 e o início de 1978. O aterro serviu como modelo em escala real para a realização de estudos geotécnicos diversos na PUC-Rio, auxiliando o projeto de um empreendimento imobiliário da época. A obra foi embargada pouco tempo após seu início e, desde então, nenhum empreendimento foi realizado. Em 2013, novas amostras *Shelby* foram extraídas, para a realização dos ensaios de laboratório desta pesquisa. Ensaios de campo também foram realizados. Verificou-se que os recalques causados pela construção do aterro ainda estão ocorrendo, 37 anos após sua execução. Compararam-se, também, os valores de OCR de laboratório com os obtidos por meio de correlações empíricas com os resultados de campo. Por fim, foram feitas previsões da evolução do recalque médio com o tempo e da magnitude do valor total médio.

Palavras-chave

Monitoramento de recalques; solos moles; ensaios de campo; ensaios de laboratório; compressão secundária.

Abstract

Azevedo, Fernando Duarte; Sayão, Alberto de Sampaio Ferraz Jardim (Advisor); Sandroni, Sandro Salvador (Co-Advisor). **Settlements of the soft soils deposit Camboinhas, RJ**. Rio de Janeiro, 2015. 144 p. MSc. Dissertation. Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Monitoring of embankment settlements using periodic topographic leveling allows one to preview their evolution, and to assess the parameters used in a specific design. In this research, settlements of an experimental embankment constructed between the end of 1977 and the beginning of 1978, over a 12 m thick soft soils deposit in Camboinhas, Niteroi (RJ), were monitored. At that time, the embankment served as large model to help designing of a commercial housing development. The work was hampered shortly after the end of embankment's construction and, since then, no enterprise was held. In 2013, in this research, new Shelby samples were obtained in order to carry out series of laboratory tests. Settlements due to the embankment construction were noted to be still progressing. Also, OCR values from laboratory tests were compared to those empirically evaluated from field results. Finally, the magnitude of total settlement and its progress with time were estimated.

Keywords

Settlements monitoring; soft soils; field tests; laboratory tests; secondary compression.

Sumário

1	Introdução	21
1.1	Contexto	21
1.2	Objetivos e Motivação	26
1.3	Estrutura do Trabalho	27
2	Revisão Bibliográfica	28
2.1	Aspectos Gerais sobre Solos Moles	28
2.2	Ensaio de Laboratório	29
2.2.1	Caracterização	29
2.2.2	Adensamento	30
2.3	Ensaio de Campo	38
2.3.1	SPT (<i>Standard Penetration Test</i>)	38
2.3.2	Piezocone (CPTu)	38
2.3.3	Palheta (<i>Vane Test</i>)	41
2.4	Medição de Recalques em Aterros	43
2.5	Aspectos da Compressão Secundária de Solos	44
2.6	O Método de Asaoka (1978)	47
3	Materiais e Métodos	49
3.1	Generalidades	49
3.1.1	Aspectos Geológico-Geomorfológicos do Local	49
3.1.2	Perfil Geotécnico	49
3.1.3	Amostragem de Campo	52
3.2	Medições de Recalque	56
3.3	Ensaio de Campo	67
3.4	Ensaio de Laboratório	69
3.4.1	Caracterização	69
3.4.2	Adensamento	71

4	Análise dos Resultados	79
4.1	Ensaio de Laboratório e Campo	79
4.1.1	Ensaio de Caracterização	79
4.1.2	Ensaio de Piezocone e Dissipação	81
4.1.3	Ensaio de Palheta	83
4.1.4	Ensaio de Adensamento	84
4.2	Medições de Recalque	94
4.3	Estimativa de Recalques	101
4.3.1	Recalque Primário	101
4.3.2	Recalque Secundário	103
5	Conclusões e Sugestões	107
	Referências Bibliográficas	109
	Apêndices	115
	Apêndice 1 – Aspecto visual das amostras	
	Apêndice 2 – Gráficos dos ensaios de piezocone	
	Apêndice 3 – Gráficos dos ensaios de dissipação em piezocone	
	Apêndice 4 – Gráficos dos ensaios de palheta	
	Apêndice 5 – Curvas de compressibilidade e c_v dos ensaios de adensamento	
	Apêndice 6 – Incerteza nas curvas “recalque x tempo” – Camboinhas	

Lista de Figuras

Figura 1.1 – Local estudado – Camboinhas, Niterói (imagem do Google Maps)	22
Figura 1.2 – Depósito mole estudado em Camboinhas, destacado em vermelho - a oeste da Lagoa de Itaipu (imagem do Google Maps)	23
Figura 1.3 - Plano urbanístico previsto para a região (Russo Neto, 1980)	24
Figura 1.4 – Imagem ampliada do local onde foi executado o aterro experimental – planta (imagem do Google Maps)	25
Figura 2.1 – Índices de compressibilidade do solo (Sayão, 1980)	31
Figura 2.2 – Determinação de σ'_p pelo Método de Casagrande (1936)	32
Figura 2.3 – Determinação de σ'_p pelo Método de Pacheco Silva (1970)	32
Figura 2.4 – Determinação de σ'_p pelo Método de Sridharan <i>et al.</i> (1991)	33
Figura 2.5 – Método de Casagrande para determinação de c_v	34
Figura 2.6 – Método de Taylor para determinação de c_v	34
Figura 2.7 – Dimensões dos tubos amostradores	36
Figura 2.8 – Gráficos $F_r \times Q_t$ e $B_q \times Q_t$ (Robertson, 1990)	39
Figura 2.9 – Correção de s_u de palheta (Bjerrum, 1973)	42
Figura 2.10 – Curva recalque x log tempo (Pinto, 2001)	45
Figura 2.11 – Definição de C_α (Lambe e Whitman, 1969)	46
Figura 2.12 – Recalque nos tempos "k" e "k-1" (Asaoka, 1978)	48
Figura 3.1 – Perfil geotécnico ao longo do eixo leste-oeste do aterro (Russo Neto, 1980)	50
Figura 3.2 – Perfil geotécnico obtido em ensaios de piezocone, em 2013	51
Figura 3.3 – Localização do aterro experimental (Russo Neto, 1980)	52
Figura 3.4 – Dimensões do aterro e do espaçamento entre placas de recalque, e local aproximado das verticais de retirada das amostras (imagem do Google Maps)	53
Figura 3.5 – Foto do local verticais de retirada das amostras indeformadas	53

Figura 3.6 – Procedimento de amostragem	55
Figura 3.7 – Instalação do novo <i>benchmark</i>	58
Figura 3.8 – Pino metálico, à esquerda, e cabeça boleada, à direita	58
Figura 3.9 – Instalação de pino metálico	59
Figura 3.10 – Circuito fechado de medições (localização aproximada dos pontos)	60
Figura 3.11 – Nível NA2 com micrômetro acoplado	61
Figura 3.12 – Execução de nivelamento, com a mira suportada por tripé metálico	63
Figura 3.13 – Visada em campo	65
Figura 3.14 – Visada em campo	65
Figura 3.15 – Ensaio de campo – planta (localização aproximada dos pontos)	67
Figura 3.16 – Ensaio de palheta e piezocone em andamento	67
Figura 3.17 – Ponteira cônica com pedra porosa na base do cone (medições de u_2)	68
Figura 3.18 – Difratometria de Raios-X (Carvalho, 1980)	70
Figura 3.19 – Amostra de solo orgânico sobrenadando a água destilada	71
Figura 3.20 – Moldagem do corpo-de-prova do ensaio de adensamento	74
Figura 3.21 – (a) Prensas de adensamento; (b) Célula de adensamento	74
Figura 3.22 – Braço de alavanca da prensa de adensamento impedido de se deslocar pelo apoio de segurança	75
Figura 4.1 – Variação da umidade, limites de consistência e teor de matéria orgânica	80
Figura 4.2 – Curvas granulométricas das amostras	80
Figura 4.3 – Relação $B_q \times Q_t$ para diferentes velocidades de ensaio	82
Figura 4.4 – Perfis de s_u nas condições indeformada e amolgada	83
Figura 4.5 – Oxidação interna do tubo	86
Figura 4.6 – Perfis de OCR - Velocidade de cravação normal (20 mm/s)	88
Figura 4.7 – Perfis de OCR - Velocidade de cravação rápida (58,4 mm/s)	89
Figura 4.8 – Perfis de OCR - Velocidade de cravação lenta (6,0 mm/s)	90
Figura 4.9 – Perfis de OCR - Velocidade de cravação muito lenta (2,0 mm/s)	91

Figura 4.10 – Curva "recalque x log tempo" do ensaio AD-1.2	94
Figura 4.11 – Última etapa de carregamento - escala ampliada	94
Figura 4.12 – Recalques medidos em Camboinhas	96
Figura 4.13 – Análise dos erros das medições de recalque	98
Figura 4.14 – NA nos locais das antigas placas de recalque	99
Figura 4.15 – Recalques médios e curva logarítmica de ajuste	103
Figura 4.16 – Aplicação do Método de Asaoka	104
Figura 4.17 – Evolução dos recalques primário e secundário - $C_a/(1+e_o) = 0,094$	106
Figura 4.18 – Recalques estimados - $OCR_{sf} = 1,60$	106

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 – Classificação da qualidade de amostras indeformadas (Lunne <i>et al.</i> , 1997)	37
Tabela 2.2 – Classificação da qualidade de amostras indeformadas brasileiras (Coutinho <i>et al.</i> , 2002)	37
Tabela 2.3 – Classificação de solos por tipo de comportamento	39
Tabela 2.4 – Fator tempo modificado (T^*) (Houlsby e Teh, 1988)	41
Tabela 3.1 - Algumas características dos tubos e amostras extraídas	56
Tabela 3.2 – Correção das cotas dos pontos nivelados (valores em cm)	64
Tabela 3.3 – Erros inerentes ao processo de nivelamento geométrico - adaptado de Tassi (2014)	66
Tabela 3.4 – Velocidades de cravação da ponteira cônica do ensaio de piezocone	68
Tabela 3.5 – Número de ensaios de adensamento realizados por amostra	72
Tabela 3.6 – Sequência de carregamentos, em kPa, dos ensaios convencionais	78
Tabela 3.7 – Sequência de carregamentos, em kPa, dos ensaios não convencionais	78
Tabela 4.1 – Resultados dos ensaios de caracterização	79
Tabela 4.2 – Coeficientes de adensamento do ensaio de dissipação	83
Tabela 4.3 – Sensitividade do solo	84
Tabela 4.4 – Coeficientes de adensamento vertical (Sandroni <i>et al.</i> , 1981)	85
Tabela 4.5 – Alguns parâmetros obtidos nos ensaios de adensamento	86
Tabela 4.6 – Tensões de pré-adensamento (σ'_p) e OCR obtidos por diferentes métodos	87
Tabela 4.7 – Obtenção de OCR pela equação SHANSEP (Ladd, 1991)	92
Tabela 4.8 – Resultados dos ensaios de adensamento não convencionais (C_d/C_c)	93
Tabela 4.9 – Cálculo do recalque devido à variação do NA	100

Tabela 4.10 – Cálculo do recalque primário com dados (à exceção de c_v) de Carvalho (1980)

102

Lista de Abreviaturas e Símbolos

Romanos

a	Coefficiente angular de ajuste - método de Asaoka
b	Coefficiente linear de ajuste - método de Asaoka
BM	<i>Benchmark</i> (referência de nível)
B _q	Parâmetro de poropressão
C _a	Razão de áreas do tubo amostrador
C _i	Folga interna do tubo amostrador
C _α	Coefficiente de compressão secundária
C _c	Índice de compressão do solo
C _r	Índice de recompressão do solo
C _s	Índice de descompressão do solo
c _h	Coefficiente de adensamento horizontal
c _v	Coefficiente de adensamento vertical
c _{v 50}	Coefficiente de adensamento vertical (Casagrande)
c _{v 90}	Coefficiente de adensamento vertical (Taylor)
CPTu	Ensaio de piezocone
D _a	Diâmetro da ponta do tubo amostrador
D _e	Diâmetro externo do tubo amostrador
D _i	Diâmetro interno do tubo amostrador
e	Índice de vazios
e _o	Índice de vazios inicial
e _{σ'vo}	Índice de vazios correspondente a σ'_{vo}
f _s	Atrito da luva do cone
F _r	Atrito lateral normalizado
G _s	Densidade real dos grãos do solo
H	Espessura da camada de solo mole
H _d	Distância vertical máxima de drenagem

IP	Índice de plasticidade
I_R	Índice de rigidez do solo
k	Coefficiente de permeabilidade
k_h	Coefficiente de permeabilidade horizontal
k_v	Coefficiente de permeabilidade vertical
k_0	Coefficiente de empuxo lateral no repouso
K_1, K_2	Fatores de correlação empíricos para tensão de sobreadensamento (ensaio CPTu)
L	Comprimento da mira
L_R	Leitura de ré
L_V	Leitura de vante
LL	Limite de liquidez
LP	Limite de plasticidade
M	Torque máximo – ensaio de palheta
m_v	Coefficiente de deformação volumétrica
m	Parâmetro empírico (equação SHANSEP)
m	Coefficiente angular do ajuste (método da raiz do tempo)
MO	Matéria orgânica
N_{SPT}	Número de golpes no ensaio SPT
OCR	<i>Overconsolidation ratio</i> (razão de sobreadensamento)
p_0	Tensão vertical efetiva inicial no centro da camada
p_c	Tensão de sobreadensamento no centro da camada
PPI	Perda por ignição
q_c	Resistência de ponta – ensaio CPTu
q_t	Resistência de ponta corrigida – ensaio CPTu
Q_t	Resistência de ponta normalizada – ensaio CPTu
r	Razão entre a compressão primária e a compressão total
R	Raio do piezocone
S	Parâmetro de ajuste – equação SHANSEP
S_t	Sensibilidade da argila
s_u	Resistência não drenada
s_{ur}	Resistência não drenada amolgada (ou residual)
$s_{u \text{ palheta}}$	Resistência não drenada obtida no ensaio de palheta

S_u campo	Resistência não drenada corrigida pelo fator de Bjerrum
SPT	Ensaio SPT (<i>Standard Penetration Test</i>)
t	Tempo
t_{pf}	Tempo para término do adensamento primário
t_{sf}	Tempo estimado de término do recalque secundário
TMO	Teor de matéria orgânica
T^*	Fator tempo modificado
U	Excesso de poropressão normalizado
U_v	Porcentagem de adensamento vertical
u	Poropressão
u_e	Excesso de poropressão no tempo “t”
u_0	Excesso de poropressão inicial
u_2	Poropressão na base do cone – ensaios de piezocone
v_m	Velocidade média de recalque
z	Profundidade em relação ao topo da camada em adensamento
z_i	Cota do ponto “i”

Gregos

α	Parâmetro adimensional da correlação de Mayne e Mitchell
α_s	Fator de proporcionalidade de Buisman
Δ	Indicador de variação no valor de uma variável
$\Delta\sigma'_v/\sigma'_v$	Razão de incremento de carga
∂	Derivada parcial
ε_v	Deformação vertical
$\dot{\varepsilon}$	Velocidade de deformação vertical (o mesmo que $d\varepsilon/dt$)
λ	Incerteza associada ao processo de nivelamento geométrico
γ	Peso específico do solo
γ_{aterro}	Peso específico do aterro
γ_{nat}	Peso específico natural do solo

γ_{sat}	Peso específico saturado do solo
γ_w	Peso específico da água
γ_{sub}	Peso específico submerso do solo
μ	Fator de correção de Bjerrum
μ	Média da amostra
ρ	Recalque total
ρ_t	Recalque no tempo “t”
$\rho_{t+\Delta t}$	Recalque no tempo “t+Δt”
ρ_f	Recalque final
ρ_{pf}	Recalque primário final
ρ_{sf}	Recalque secundário final
σ	Desvio padrão da amostra
σ_v	Tensão vertical total
σ'_{vo}	Tensão vertical efetiva inicial ou de campo
σ'_v	Tensão vertical efetiva
σ'_p	Tensão de sobreadensamento
τ	Resistência não drenada
ω	Teor de umidade do solo

Não diga que a vitória está perdida, se é de batalhas que se vive a vida.

Raul Seixas.