



Ingrid Magalhães Tavares da Silva

**Utilização de vácuo em ensaios de
laboratório em solo indeformado:
carregamento unidimensional e isotrópico**

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 da PUC-Rio.

Orientador: Prof. José Tavares Araruna Jr.
Co-Orientador: Prof. Sandro Salvador Sandroni

Rio de Janeiro
Abril de 2013



Ingrid Magalhães Tavares da Silva

**Utilização de vácuo em ensaios de
laboratório em solo indeformado:
carregamento unidimensional e isotrópico**

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. José Tavares Araruna Jr.

Orientador

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Prof. Sandro Salvador Sandroni

Co-Orientador

Geoprojetos Ltda

Prof. Edgar Odebrecht

Universidade do Estado de Santa Catarina

Prof. Maria Esther Soares Marques

Instituto Militar de Engenharia / RJ

Rio de Janeiro, 22 de abril de 2013

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

Ingrid Magalhães Tavares da Silva

Graduou-se em Engenharia Civil na Universidade de Fortaleza (UNIFOR), em Fortaleza – Ceará - Brasil, em 2011.

Ficha Catalográfica

Silva, Ingrid Magalhães Tavares da

Utilização de vácuo em ensaios de laboratório em solo indeformado : carregamento unidimensional e isotrópico / Ingrid Magalhães Tavares da Silva ; orientador: Jose Tavares Araruna Jr. ; co-orientador: Sandro Salvador Sandroni. – 2013.

123 f. : il. (color.) ; 30 cm

Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil, 2013.

Inclui bibliografia

1. Engenharia civil – Teses. 2. Vácuo. 3. Ensaios de laboratório. 4. Melhoramento de solos moles. 5. Adensamento. 6. Compressibilidade. I. Araruna Jr., Jose Tavares. II. Sandroni, Sandro Salvador. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. IV. Título.

CDD: 624

“Tudo é possível àquele que crer”

À minha fonte de inspiração, meu pai, Delto
e a minha querida mãe, Bernarda.

Agradecimentos

Ao Pai Celeste, o Onipresente e Onisciente, por me dar a força e a energia necessária para cumprir mais uma etapa na minha vida.

Ao meu pai, que me incentivou na Engenharia Geotécnica, e a quem devo muito do que sei e do que aprendi, e à minha amada mãe, meu porto seguro, Bernarda. Meus sinceros agradecimentos àqueles que buscaram sempre me transmitir os ensinamentos da vida.

As minhas queridas irmãs, Fabienne e Chelsea.

A minha família que apesar da distância sempre esteve presente com carinho e confiança.

Ao meu orientador, Jose Tavares Araruna Jr. pelos conceitos transmitidos, sugestões e orientação ao longo de toda pesquisa.

Ao querido professor e orientador, Sandro Sandroni, por todo apoio, mas principalmente por todo tempo dispensado em reuniões, que muito contribuíram na minha formação. Muito obrigada pela sua dedicação, sua paciência, sua confiança e pela amizade.

Ao querido professor Alberto Sayão, a quem muito me ajudou durante toda minha trajetória do mestrado na PUC-Rio, o meu muito obrigado professor pela confiança, pelo incentivo e pela amizade.

À Manuella Galindo, por sua amizade incondicional, pelo apoio e as inúmeras vezes que me ajudou.

Às queridas amigas Juliana Mochel, Simone Peres, Mariana Benessiuti, Stela Martins, Nathalia Passos, Bianca Lima e Jackeline Castañeda pelas contínuas mensagens de apoio, amizade e momentos de descontração.

Aos amigos, Mario Bonillac e Thiago Carnavale, pela amizade e pelo apoio.

A todos meus amigos da sala 614 e da Pós-Graduação, pelos momentos de alegria e amizade.

Ao corpo docente de Engenharia Civil da PUC-Rio, por todos os importantes ensinamentos transmitidos durante o curso de mestrado.

À empresa Tecnogeo por cederem a bomba de vácuo, necessária ao desenvolvimento deste estudo.

À Monica Moncada pela disposição, ajuda e auxílio fornecido no Laboratório de Geotecnia. Aos técnicos do laboratório, Deivid, Amaury, Rogério, Alex e Josué pelo apoio para realizar os ensaios.

Ao CNPq e à PUC-Rio, pelo apoio financeiro indispensável ao desenvolvimento deste trabalho.

Resumo

Silva, Ingrid Magalhães Tavares da; Araruna Jr, José Tavares (Orientador); Sandroni, Sandro Salvador (Co-orientador). **Utilização de vácuo em ensaios de laboratório em solo indeformado: carregamento unidimensional e isotrópico**. Rio de Janeiro, 2013. 123 p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Civil da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O uso da sobrecarga a vácuo como um método eficiente no tratamento de solo mole é discutido através de ensaios de laboratório, usando solo indeformado. As características do adensamento a vácuo foram investigadas em laboratório através de ensaios edométricos, comparando carregamento com uso de vácuo ou carga convencional. Foram realizados ensaios na câmara triaxial, comparando o uso da pressão de vácuo e pressão atmosférica. Os resultados indicam que: (1) Os resultados dos ensaios edométricos sugerem que a aplicação de vácuo funciona de maneira equivalente ao incremento de carga convencional e induz a valores de recalques maiores quando comparado com a aplicação de uma carga convencional de mesma magnitude. (2) A partir dos resultados dos ensaios triaxiais, verificou-se que o uso da pressão de vácuo acelera a dissipação da poropressão quando comparado ao adensamento com a ação da pressão atmosférica. (3) As características de adensamento do solo não mostram discriminação contra a natureza da pressão de pré-adensamento, se são sob condições de pressão de vácuo, pressão atmosférica ou carregamento convencional.

Palavras-chave:

Vácuo; ensaios de laboratório; melhoramento de solos moles; adensamento; compressibilidade.

Abstract

Silva, Ingrid Magalhães Tavares da; Araruna Jr, José Tavares (Advisor); Sandroni, Sandro Salvador (Co-advisor). **Use of vacuum in laboratory tests on undisturbed soil: one-dimensional and isotropic loading.** Rio de Janeiro, 2013. 123 p. MSc. Dissertation – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The use of vacuum surcharge as an effective technique in the treatment of soft soil is discussed in analysis in laboratory behavior. Laboratory tests using undisturbed soil were performed to investigate the use of the technique. The characteristics of the vacuum consolidation were studied in the laboratory by oedometer tests comparing loading with the use of vacuum or conventional load. Tests were performed in triaxial chamber comparing the use of vacuum pressure and atmospheric pressure. The results indicate that: (1) The test results of oedometer test indicate that vacuum application operates in a manner equivalent to the conventional incremental load and induces the largest values of settlement when compared with the conventional application of a load of the same magnitude. (2) The results of the triaxial tests, it was found that the use of vacuum pressure accelerates the dissipation of pore pressure when compared with the action of atmospheric pressure. (3) The consolidation characteristics of the soil show no discrimination against the nature of the consolidation pressure, whether they are consolidated under vacuum pressure, atmospheric pressure or loading conventional.

Keywords:

Vacuum; laboratory tests; soft soils improvement;; consolidation; compressibility.

Sumário

1 INTRODUÇÃO	18
1.1. Relevância e Justificativa da Pesquisa	18
1.2. Objetivos	19
1.3. Organização do trabalho	20
2 REVISÃO BIBLIOGRAFICA	22
2.1. Teoria do Adensamento de Terzaghi	22
2.1.1. Hipóteses Simplificadoras	22
2.1.2. Equação do Adensamento	23
2.1.3. Ensaio de Adensamento Edométrico	30
2.1.4. Ensaio Triaxial	36
2.2. Técnicas Construtivas sobre Solos Moles	38
2.2.1. Substituição Total ou Parcial de Solos Moles	38
2.2.2. Construção em Etapas	39
2.2.3. Aterros sobre Estacas e Colunas	39
2.2.4. Drenos Verticais	40
2.2.5. Sobrecarga Convencional	41
2.2.6. Sobrecarga a Vácuo	43
3 PROGRAMA EXPERIMENTAL	56
3.1. Ensaio de Caracterização Geotécnica	57
3.1.1. Granulometria	57
3.1.2. Limites de Consistência	57
3.1.3. Massa Especifica Real dos Grãos	58
3.1.4. Determinação do Teor de Matéria Orgânica	58
3.2. Ensaio de Adensamento Unidimensional	58
3.2.1. Equipamentos e Metodologias do Ensaio	59
3.3. Ensaio de Adensamento Isotrópico	69
3.3.1. Equipamento Triaxial	70

3.3.2. Metodologias	77
4 APRESENTAÇÃO E DISCUSÃO DOS RESULTADOS	83
4.1. Ensaio de Caracterização Geotecnia	83
4.1.1. Análise Granulométrica	83
4.2. Ensaio de Adensamento Unidimensional	85
4.3. Ensaio de Adensamento Isotrópico	96
4.3.1. Ensaio com vácuo	97
4.3.2. Ensaio sem vácuo	102
4.3.3. Comportamento da variação volumétrica	107
4.3.4. Comparação da poropressão	110
5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	113
5.1. Conclusões	113
5.2. Sugestões para pesquisas futuras	115
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	116
ANEXO I EQUAÇÃO DE CALIBRAÇÃO	123

Índice de Figuras

Figura 2.1 – Porcentagem de adensamento U_z da camada de solo saturado em função da profundidade normalizada Z e do fator tempo T_v para excesso uniforme de poropressão inicial, u_0 (Fonte: Lambe e Whitman, 1969).....	27
Figura 2.2 – Grau de adensamento médio de uma camada de solo saturado: (a) incremento da poropressão inicial uniforme; (b) U versus T (Fonte: Lambe e Whitman, 1969)	28
Figura 2.3 –Determinação do coeficiente de adensamento através do Método de Casagrande (Fonte: Casagrande 1936, <i>apud</i> Netto,2006)	32
Figura 2.4 – Determinação do coeficiente de adensamento através do Método de Taylor (1948).....	33
Figura 2.5 – Índice de vazios <i>versus</i> tensão vertical efetiva (Craig, 2004 <i>apud</i> Romanel 2011).....	34
Figura 2.6 – Relação teórica entre a porcentagem de dissipação da poropressão na base da amostra e o fator tempo (Fonte: Bishop e Henkel, 1962).....	37
Figura 2.7 – Compensação dos recalques primários através de sobrecarga adicional (Fonte: Adaptado de Johnson, 1970).....	42
Figura 2.8 - Analogia da mola do processo do adensamento com ação da: sobrecarga convencional; (Fonte: Adaptado de Chu e Yan, 2005)...	45
Figura 2.9 – Parâmetros do solo (Fonte: Adaptado de Masse et al.,2001)	45
Figura 2.10 – Analogia da mola do processo de adensamento com ação da: sobrecarga a vácuo. (Fonte: Adaptado de Chu e Yan, 2005)	46
Figura 2.11 – Variação da poropressão e da tensão efetiva: (a) sobrecarga convencional; (b) sobrecarga a vácuo (Fonte: Adaptado de Chu e Yan, 2005).....	48
Figura 2.12 – Diagrama $p' \times q'$ (Fonte: Adaptado de Masse et al.,2001).	49

Figura 2.13 – Sistema de vácuo com membrana (Fonte: Adaptado de Sandroni et al., 2012).....	52
Figura 2.14 - Sistema de aplicação de vácuo dreno a dreno (Fonte: Adaptado de Sandroni et al., 2012).....	54
Figura 2.15 – Junção do trecho impermeável com o dreno: (a) dreno fita; (b) dreno estrela (Fonte: Sandroni et al., 2012)	54
Figura 3.1 – Prensa de adensamento tipo Bishop do LGMA da PUC-Rio: (a) vista de frente e (b) vista lateral.....	59
Figura 3.2 – Processo de extração e moldagem da amostra do tubo amostrador.....	61
Figura 3.3 – (a) Célula fabricada de PVC e (b) Célula convencional	62
Figura 3.4 – Processo de montagem da célula	63
Figura 3.5 – Sistema de vedação da célula de adensamento	64
Figura 3.6 – Célula de adensamento ajustada na prensa com sistema de vedação.....	64
Figura 3.7 – (a) Abaixamento do O’ring com auxílio da seringa de plástico e (b) O’ring após abaixamento	65
Figura 3.8 – Topo do Cap preenchido com graxa de vaselina	65
Figura 3.9 – Bomba de vácuo	66
Figura 3.10 – Sistema externo de arrefecimento da água.....	67
Figura 3.11 – Tanque de acrílico com a interface ar/água	68
Figura 3.12 – Detalhe do regulador de altura	68
Figura 3.13 – Componentes do sistema triaxial utilizado na pesquisa	71
Figura 3.14 – Câmara triaxial	71
Figura 3.15 – (a) Visão geral do ensaio, (b) Sistema de válvulas na base da prensa triaxial.....	72
Figura 3.16 – Medidor de Variação Volumétrica	73
Figura 3.17 – Transdutor de pressão durante execução do ensaio	75
Figura 3.18 – Sistema de aplicação de pressões.....	75
Figura 3.19 – Sistema central de aquisição de dados.....	76
Figura 3.20 – Válvulas responsáveis pela aplicação da tensão confinante e medição do MVV	79
Figura 3.21 - Válvulas responsáveis pela medição da poropressão no topo da amostra	80

Figura 3.22 - Válvulas responsáveis pela aplicação da pressão de vácuo ou atmosférica.....	81
Figura 4.1 – Curva granulométrica do solo mole.....	83
Figura 4.2 – Correlação entre umidade e PPI (Fonte: Sandroni, 2012) ...	85
Figura 4.3 – Comparação das curvas índice de vazios x tensão vertical efetiva.....	88
Figura 4.4 – Comparação das curvas do sétimo estágio de carregamento	89
Figura 4.5 – Porcentagem média de adensamento <i>versus</i> fator tempo: AU-01	90
Figura 4.6 - Porcentagem média de adensamento <i>versus</i> fator tempo: AU-02	90
Figura 4.7 - Coeficiente de adensamento <i>versus</i> tensão vertical efetiva para ensaio AU-01	91
Figura 4.8 - Coeficiente de adensamento <i>versus</i> tensão vertical efetiva para ensaio AU-02	92
Figura 4.9 – Permeabilidade <i>versus</i> tensão vertical efetiva para ensaio AU-01	93
Figura 4.10 – Permeabilidade <i>versus</i> tensão vertical efetiva para ensaio AU-02	93
Figura 4.11 – Coeficiente de Permeabilidade <i>versus</i> tensão vertical efetiva	94
Figura 4.12 - Poropressão <i>versus</i> tempo, amostra 5,5 cm com vácuo	99
Figura 4.13 - Poropressão <i>versus</i> tempo, amostra 3,8 cm com vácuo	99
Figura 4.14 - Poropressão <i>versus</i> tempo, amostra 2,5 cm com vácuo ..	100
Figura 4.15 – Grau de adensamento <i>versus</i> Fator Tempo, amostra 5,5 cm com vácuo.....	101
Figura 4.16 - Grau de adensamento <i>versus</i> Fator Tempo, amostra 3,8 cm com vácuo.....	101
Figura 4.17 – Grau de Adensamento <i>versus</i> Fator Tempo, amostra 2,5 cm com vácuo.....	102
Figura 4.18 - Poropressão <i>versus</i> tempo, amostra 5,5 cm sem vácuo ..	104
Figura 4.19 - Poropressão <i>versus</i> tempo, amostra 3,7 cm sem vácuo ..	104
Figura 4.20 - Poropressão <i>versus</i> tempo, amostra 2,5 cm sem vácuo ..	105

Figura 4.21 - Grau de Adensamento <i>versus</i> Fator Tempo, amostra 5,5 cm sem vácuo.....	106
Figura 4.22 - Grau de Adensamento <i>versus</i> Fator Tempo, amostra 3,5 cm sem vácuo.....	106
Figura 4.23 - Grau de Adensamento <i>versus</i> Fator Tempo, amostra 2,5 cm sem vácuo.....	107
Figura 4.24 – Porcentagem de deformação volumétrica <i>versus</i> tempo, amostra de 5,5 cm.....	109
Figura 4.25 - Porcentagem de deformação volumétrica <i>versus</i> tempo, amostra de 3,5 cm.....	109
Figura 4.26 - Porcentagem de deformação volumétrica <i>versus</i> tempo, amostra de 5,5 cm.....	110
Figura 4.27 – Variação da poropressão <i>versus</i> o tempo para amostra de 2,5 cm.	111
Figura 4.28 - Variação da poropressão <i>versus</i> o tempo para amostra de 3,5 cm.	111
Figura 4.29 - Variação da poropressão <i>versus</i> o tempo para amostra de 5,5 cm.	112
Figura A.I.1- Dados e equação da calibração	112

Índice de Tabelas

Tabela 2.1 – Avaliação da Porcentagem média de adensamento U	29
Tabela 2.2 – Relação entre o fator tempo T_v e a porcentagem de dissipação da poropressão na base da amostra e drenagem a partir do topo (Fonte: Bishop e Henkel, 1962)	37
Tabela 3.1 – Resumo do Programa Experimental	56
Tabela 3.2 – Altura dos ensaios de adensamento isotrópico na câmara triaxial	70
Tabela 4.1 – Resumo do ensaio de caracterização	84
Tabela 4.2 – Teor de matéria orgânica	84
Tabela 4.3 – (a) Parâmetros iniciais e (b) Resumo dos resultados do ensaio do adensamento unidimensional AU-01	86
Tabela 4.4 - (a) Parâmetros iniciais e (b) Resumo dos resultados do ensaio do adensamento unidimensional AU-02	87
Tabela 4.5 – Valores dos parâmetros de compressibilidade	94
Tabela 4.6 – Índices de compressibilidade para solos moles do Estado do Rio de Janeiro	95
Tabela 4.7 – Resumo dos ensaios realizados	97
Tabela 4.8 – Variação de volume dos corpos de prova	108
Figura A.I.1- Curva da calibração .	112

Lista de Símbolos

a_v	Coeficiente de compressibilidade
B	Parâmetro B de Skempton
C_c	índice de compressão
C_r	índice de recompressão
c_v	coeficiente de adensamento
C_α	compressão secundária
e	índice de vazios;
Gs	densidade relativa dos grãos
H_d	distância de drenagem
k_v	coeficiente de permeabilidade vertical
Ko	coeficiente de empuxo no Repouso
t	tempo;
T_v	fator tempo
m_v	coeficiente de variação volumétrica
Pa	pressão atmosférica
Psc	carga provisória
PPE	carga permanente
ΔH_{PE}	variação do recalque devido a carga permanente
ΔH_{SC}	variação do recalque devido a carga provisória
S	grau de saturação
Uv	porcentagem de adensamento
U	porcentagem média de adensamento
u_e	excesso de poropressão no tempo t
\bar{u}_g	excesso de poropressão média na camada
u_0	excesso de poropressão inicial
w	umidade
z	distância vertical entre um ponto e a superfície de aplicação do carregamento
γ_{nat}	peso específico natural do solo

γ_w – peso específico da água

Δe – variação do índice de vazios

Δp – incremento de pressão

$\Delta \sigma'_v$ – variação da tensão vertical efetiva

$\Delta \sigma_c$ – acréscimo de tensão confinante aplicado

Δu – excesso de poropressão gerado

σ_c - tensão confinante

σ'_o - tensão efetiva inicial

ε – deformação

ε_f – deformação final

σ'_h - tensão horizontal efetiva

σ'_v - tensão vertical efetiva