



**Ygor Almeida Netto**

**Estudo Experimental das Características de  
Compressibilidade e Adensamento de uma Argila Mole**

**Dissertação de Mestrado**

Dissertação apresentada ao Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências de Engenharia Civil: Geotecnia.

Orientador: Alberto S. F. J. Sayão

Rio de Janeiro, dezembro de 2006.



**Ygor Almeida Netto**

## **Estudo Experimental das Características de Compressibilidade e Adensamento de uma Argila Mole**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

**Prof. Alberto Sampaio Ferraz Jardim Sayão**

Presidente Orientador

Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

**Prof. Franklin dos Santos Antunes**

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

**Prof. Sérgio Augusto Barreto da Fontoura**

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

**Prof. Ana Cristina Castro Fontenla Sieira**

Departamento de Engenharia Civil - UERJ

**Prof. José Eugênio Leal**

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 15 de dezembro de 2006

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

## **Ygor Almeida Netto**

Graduou-se em Engenharia Civil, pela Universidade Federal do Pará (UFPA), em fevereiro de 2004. Ingressou no curso de mestrado em Engenharia Civil da PUC-Rio em março do ano de 2004, atuando na área de Geotecnia Experimental, trabalhando com ensaios especiais de laboratório.

### Ficha Catalográfica

Almeida Netto, Ygor

Estudo experimental das características de compressibilidade e adensamento de uma argila mole / Ygor Almeida Netto ; orientador: Alberto S. F. J. Sayão. – 2006.

106 f. : il. ; 30 cm

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)– Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

Inclui bibliografia

1. Engenharia Civil – Teses. 2. Ensaio de laboratório. 3. Argila mole. I. Sayão, Alberto S. F. J. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. III. Título.

CDD: 624

*Aos meus pais, Francisco e Eliana,  
com todo o amor do mundo*

## **Agradecimentos**

À força maior que é responsável por nossa existência e por ter dado a mim a capacidade de realizar este trabalho: Deus.

Aos meus pais, Francisco e Eliana, pessoas que tanto amo, admiro e tenho orgulho de ser filho, por sempre apoiar-me na realização de meus sonhos.

Aos meus irmãos, que sempre me incentivaram na busca de meus objetivos.

Ao meu orientador, Alberto Sayão, pela amizade e orientação. Obrigado pela sua compreensão durante o desenvolvimento deste trabalho!

Aos professores do DEC/PUC-Rio, em especial aos da área de Geotecnia, pela transmissão de seus conhecimentos.

Aos funcionários do DEC/PUC-Rio, em especial, Rita, William e Amaury, pelo apoio técnico durante a realização de minha pesquisa.

Aos amigos feitos na PUC-Rio, em especial Álvaro Viana, Christiano Teixeira, Diego Orlando, Thiago Pecin e Tiago Proto. As inúmeras noites de diversão nos melhores bares e nas melhores boates do Rio de Janeiro jamais serão esquecidas.

Aos amigos de 611, Patrício, Zé Roberto, Fernando “Velinho” e Liliane pelo companheirismo e apoio durante todo esse tempo de convivência.

A minha amiga Cláudia Pacheco. Obrigado por tudo!

Aos demais, porém não menos importantes, e incontáveis amigos feitos durante este curso. Vocês nunca serão esquecidos.

Aos companheiros de longas jornadas no Rio, Adenilson e Renato. Juntos viemos, vimos e vencemos!

Aos companheiros de república: Clébson, Jean, Klessis, Léo e Silvio. Valeu por tudo galera!

Aos amigos da “terrinha” que sempre me incentivaram: André, Diego, Felipe e Tatiana; um grande abraço!

À CAPES, ao CNPq e a PUC-Rio, pelo apoio financeiro, indispensável para a realização deste trabalho.

## Resumo

Netto, Ygor Almeida; Sayão, Alberto de Sampaio Ferraz Jardim. **Estudo Experimental das Características de Compressibilidade e Adensamento de uma Argila Mole.** Rio de Janeiro, 2006. 106p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

No presente trabalho é realizado um estudo experimental das características de compressibilidade e adensamento de argilas moles. Foram realizados ensaios convencionais de adensamento (SIC) e ensaios de adensamento com velocidade constante de deformação (CRS) – em diferentes velocidades – ensaios de adensamento com uma face drenante e ensaios triaxiais. As amostras foram remoldadas em laboratório, a partir de uma mistura de bentonita e caulim, na proporção de 98 : 2 em peso, e adensadas isotropicamente, a fim de se garantir uma melhor qualidade quanto à homogeneidade e isotropia do material. Os resultados são obtidos e analisados através das curvas típicas para os ensaios de adensamento. São obtidos os valores dos parâmetros de compressibilidade e de adensamento do material. Por fim é proposto um novo método para obtenção coeficiente de adensamento vertical ( $C_v$ ) e feita uma análise comparativa com métodos existentes na literatura.

## Palavras-chave

Ensaio de laboratório, Argila mole, Adensamento.

## Abstract

Netto, Ygor Almeida; Sayão, Alberto de Sampaio Ferraz Jardim.  
**Experimental Study of the Compressibility and Consolidation Characteristics of a Soft Clay.** Rio de Janeiro, 2006. 106p. MSc  
Dissertation – Department of Civil Engineering, Pontifícia Universidade  
Católica do Rio de Janeiro.

In the present work it is carried out an experimental study of the compressibility characteristics and consolidation of a soft clay. Standard Incremental Consolidation (SIC) and Constant Rate of strain (CRS) – in different speeds – triaxial tests and consolidation with one drainage tests had been carried through. The samples had been remoulded in laboratory, from a mixture of bentonite and kaolin, in the ratio 98 : 2 In weight, and confined under isotropic conditions, in order to guarantee one better quality how much to the homogeneity and isotropy of the material. The results are gotten and analyzed through the typical curves for consolidation tests. The values of the parameters of compressibility and consolidation of the material are gotten. Finally a new method for attainment of the vertical consolidation coefficient ( $C_v$ ) and made a comparative analysis with existing methods in literature is considered.

## Keywords

Laboratory tests, Soft clays, Consolidation.



# Sumário

1. Introdução	19
2. Revisão Bibliográfica	22
2.1. Características de argilas diversas	22
2.2. Ensaio de adensamento	24
2.2.1. Ensaio de adensamento convencional (SIC)	24
2.2.2. Ensaio de adensamento com velocidade de deformação constante (CRS)	27
2.3. Parâmetros de compressibilidade	30
2.4. Parâmetros de adensamento	31
2.4.1. Métodos para obtenção do Coeficiente de Adensamento	32
3. Programa experimental	42
3.1. Introdução	42
3.2. Descrição do material	42
3.3. Caracterização geotécnica	43
3.3.1. Análise granulométrica	43
3.3.2. Massa específica real dos grãos	44
3.3.3. Limites de consistência	44
3.4. Preparação das amostras	45
3.5. Ensaio de adensamento	47
3.5.1. Ensaio de adensamento convencional (SIC)	48
3.5.2. Ensaio de adensamento com uma face drenante (SICu)	50
3.5.3. Ensaio de adensamento com velocidade constante de deformação (CRS)	52
3.6. Ensaio triaxiais	54
4. Análise de resultados	57
4.1. Caracterização geotécnica	57
4.2. Ensaio triaxiais	58
4.2.1. Deformabilidade	61
4.3. Adensamento	63
4.3.1. Velocidade de deformação	63
4.3.2. História de tensões	66
4.3.3. Índices de compressibilidade	68
4.3.4. Coeficiente de compressibilidade volumétrica ( $m_v$ )	68

4.3.5. Coeficiente de permeabilidade (k)	71
4.3.6. Coeficiente de Adensamento Vertical (Cv)	72
4.4. Proposição de método para a estimativa do Coeficiente de Adensamento Vertical (Cv)	73
4.5. Avaliação da relação proposta para a estimativa do Coeficiente de Adensamento Vertical (Cv)	75
4.6. Considerações finais	77
5. Conclusões	78
6. Referências Bibliográficas	81
ANEXOS	85

## Lista de figuras

Figura 1 – Equipamento para realização de ensaio de adensamento convencional.	25
Figura 2 – Equipamento de ensaio de adensamento CRS.	28
Figura 3 - Ensaios de adensamento unidimensional em argila sensível (Vaid et al. 1979)	29
Figura 4 – Determinação do coeficiente de adensamento através do Método de Casagrande (1936).	34
Figura 5 – Determinação do coeficiente de adensamento através do Método de Taylor (1942)	36
Figura 6 - Determinação de $C_v$ através do Método de Linearização de Deformação Finita	37
Figura 7 – Curva $T / U$ vs $T$ para obtenção de $C_v$ - Método de Ajuste Retangular Hiperbólico.	39
Figura 8 - Curva $t / \varepsilon_v$ vs $t$ para determinação de $C_v$ - Método de Ajuste Retangular Hiperbólico.	40
Figura 9 – Curva granulométrica da mistura de 98% de caulim com 2% de bentonita.	44
Figura 10 – Amostra da mistura caulim-bentonita após o adensamento hidrostático.	46
Figura 11 – Preparação do corpo de prova a partir de cravação do anel de aço inoxidável.	47
Figura 12 – Equipamento para ensaio de adensamento convencional (SIC).	49
Figura 13 – Célula de ensaio de adensamento SICu com leitura de poropressão na base	50
Figura 14 – Seqüência da montagem da célula de adensamento para realização de ensaio de adensamento com leitura de poropressão na base (SICu).	51
Figura 15 – Resultados dos ensaios triaxiais CIU	60
Figura 16 – Variação do módulo de deformabilidade ( $E$ ) durante o cisalhamento.	63
Figura 17 – Valores de razão de poropressão nos ensaios CRS.	54

Figura 18 – Valores das velocidades finais ( $v_f$ ) de deformação em ensaios SIC e SICu.	65
Figura 19 – Variação do índice de vazios com a tensão efetiva – Ensaio SIC e SICu	66
Figura 20 – Variação do índice de vazios com a tensão efetiva – Ensaio CRS	67
Figura 21 – Variação do índice de vazios com a tensão efetiva – Ensaio SIC, SICu e CRS	67
Figura 22 – Valores de $m_v$ – Ensaio SIC e SICu.	69
Figura 23 – Variação de $D$ em função da variação de velocidade em ensaios CRS.	69
Figura 24 – Variação de $D$ em função de $\sigma'_v$ em ensaios SIC e SICu.	70
Figura 25 – Variação de $D$ em função de $\sigma'_v$ em ensaios CRS.	70
Figura 26 – Variação do índice de vazios em função da variação de $k$ , para os ensaios SIC.	71
Figura 27 – Variação do índice de vazios em função da variação de $k$ , para os ensaios CRS.	72
Figura 28 – Valores de $C_v$ – Ensaio SIC e SICu.	73
Figura 29 – Variação de poropressão durante estágio de carregamento $\Delta\sigma = 40$ kPa	75
Figura 30 - Coeficiente de adensamento $C_v$ calculado por cada método, no ensaio SICu 01.	76
Figura 31 – Variação de $C_v$ obtido por vários métodos, normalizado pelo $C_v$ obtido através do método proposto, para o ensaio SICu 01.	77
Figura 32 – Curva tensão efetiva vs índice de vazios – Ensaio SIC	86
Figura 33 – Curva tensão efetiva vs índice de vazios – Ensaio SICu01	87
Figura 34 – Curva tensão efetiva vs índice de vazios – Ensaio SICu02	87
Figura 35 – Curva tensão efetiva vs índice de vazios – Ensaio CRS01	88
Figura 36 – Curva tensão efetiva vs coeficiente de adensamento – Ensaio CRS01	88
Figura 37 – Curva tensão efetiva vs coeficiente de permeabilidade – Ensaio CRS01	89
Figura 38 – Curva tensão efetiva vs coeficiente de variação volumétrica – Ensaio CRS01	89
Figura 39 – Curva tensão efetiva vs índice de vazios – Ensaio CRS02	90

Figura 40 – Curva tensão efetiva vs coeficiente de adensamento – Ensaio CRS02	90
Figura 41 – Curva tensão efetiva vs coeficiente de permeabilidade – Ensaio CRS02	91
Figura 42 – Curva tensão efetiva vs coeficiente de variação volumétrica – Ensaio CRS02	91
Figura 43 – Curva tensão efetiva vs índice de vazios – Ensaio CRS03	92
Figura 44 – Curva tensão efetiva vs coeficiente de adensamento – Ensaio CRS03	92
Figura 45 – Curva tensão efetiva vs coeficiente de permeabilidade – Ensaio CRS03	93
Figura 46 – Curva tensão efetiva vs coeficiente de variação volumétrica – Ensaio CRS03	93
Figura 47 – Curva tensão efetiva vs índice de vazios – Ensaio CRS04	94
Figura 48 – Curva tensão efetiva vs coeficiente de adensamento – Ensaio CRS04	94
Figura 49 – Curva tensão efetiva vs coeficiente de permeabilidade – Ensaio CRS04	95
Figura 50 – Curva tensão efetiva vs coeficiente de variação volumétrica – Ensaio CRS04	95
Figura 51 – Curvas do ensaio SIC para o Método de Taylor.	96
Figura 52 – Curvas do ensaio SICu01 para o Método de Taylor.	96
Figura 53 – Curvas do ensaio SICu02 para o Método de Taylor.	97
Figura 54 – Curvas do ensaio SIC para o Método de Casagrande.	97
Figura 55 – Curvas do ensaio SICu01 para o Método de Casagrande.	98
Figura 56 – Curvas do ensaio SICu02 para o Método de Casagrande.	98
Figura 57 – Curvas do ensaio SIC para o Método da Linearização das Deformações Finitas.	99
Figura 58 – Curvas do ensaio SICu01 para o Método da Linearização das Deformações Finitas.	99
Figura 59 – Curvas do ensaio SICu02 para o Método da Linearização das Deformações Finitas.	100
Figura 60 – Curvas do ensaio SIC e SICu para o Método do Ajuste Retangular Hiperbólico – Estágio $\Delta\sigma' = + 40$ kPa.	100

Figura 61 – Curvas do ensaio SIC e SICu para o Método do Ajuste Retangular Hiperbólico – Estágio $\Delta\sigma' = + 90$ kPa.	101
Figura 62 – Curvas do ensaio SIC e SICu para o Método do Ajuste Retangular Hiperbólico – Estágio $\Delta\sigma' = + 150$ kPa.	101
Figura 63 – Curvas do ensaio SIC e SICu para o Método do Ajuste Retangular Hiperbólico – Estágio $\Delta\sigma' = + 320$ kPa.	102
Figura 64 – Curvas do ensaio SIC e SICu para o Método do Ajuste Retangular Hiperbólico – Estágio $\Delta\sigma' = + 640$ kPa.	102
Figura 65 – Dissipação de poropressão durante os ensaios SICu – Estágio $\Delta\sigma' = + 40$ kPa.	103
Figura 66 – Dissipação de poropressão durante os ensaios SICu – Estágio $\Delta\sigma' = + 90$ kPa.	103
Figura 67 – Dissipação de poropressão durante os ensaios SICu – Estágio $\Delta\sigma' = + 150$ kPa.	104
Figura 68 – Dissipação de poropressão durante os ensaios SICu – Estágio $\Delta\sigma' = + 320$ kPa.	104
Figura 69 – Dissipação de poropressão durante os ensaios SICu – Estágio $\Delta\sigma' = + 640$ kPa.	105
Figura 70 – Dissipação de poropressão durante os ensaios SICu01 – Todos os estágios	105
Figura 71 – Dissipação de poropressão durante os ensaios SICu02 – Todos os estágios	106

## Lista de tabelas

Tabela 1 – Características iniciais dos corpos de prova e resultados dos ensaios de adensamento	23
Tabela 2 – Características das amostras após preparação	46
Tabela 3 – Velocidades utilizadas para os ensaios de adensamento CRS.	53
Tabela 4 – Resumo dos ensaios de caracterização	57
Tabela 5 – Características dos corpos de prova	58
Tabela 6 – Resultados dos ensaios triaxiais CIU	58
Tabela 7 – Modulo de deformabilidade ( $E_{50}$ ) obtido dos ensaios triaxiais	61
Tabela 8 – Valores dos Módulos $E_{33}$ , $E_{50}$ e $E_{67}$ para ensaios triaxiais.	62
Tabela 9 – Velocidades dos ensaios CRS	63
Tabela 10 – Velocidades dos ensaios SIC e SICu	65
Tabela 11 – Valores da tensão de pré-adensamento para ensaios CRS.	67
Tabela 12 – Valores dos índices $C_r$ , $C_s$ e $C_c$	68
Tabela 13 – Comparação entre valores de $C_v$ para o estágio $\Delta\sigma = 40$ kPa	75

## Lista de símbolos

A	Parâmetro de poropressão (Skempton, 1954)
$A_f$	Parâmetro de Skempton na ruptura
$a_v$	Coeficiente de compressibilidade
B	Parâmetro de poropressão (Skempton, 1954)
$c'$	Intercepto da envoltória de resistência $t$ vs $s$
$C_c$	Índice de compressão virgem
$C_r$	Índice de recompressão
$C_v$	Coeficiente de adensamento vertical
$C_a$	Coeficiente de compressão secundária
D	Módulo oedométrico
$e$	Índice de vazios
$e_0$	Índice de vazios inicial
E	Módulo de Young
$E_{50}$	Módulo de Young a 50% da ruptura
$E_i$	Modulo de Young inicial
Gs	Massa específica real dos grãos
Hd	Altura de drenagem
IP	Índice de plasticidade
K	Coeficiente de permeabilidade
LL	Limite de liquidez
LP	Limite de plasticidade
LVDT	Transdutor de deslocamento
$m_v$	Coeficiente de variação volumétrica
$p'_f$	Semi-soma das tensões principais efetivas na ruptura
$q_f$	Semi-diferença das tensões efetivas principais na ruptura
S	Grau de saturação
Su	Resistência ao cisalhamento em sollicitação não-drenada
T	Fator tempo
t	Tempo
U	Grau de adensamento



$u$	Poropressão
$u_b$	Poropressão na base
$v$	Velocidade
$v_{100}$	Velocidade no tempo $t_{100}$
$v_f$	Velocidade no final do estágio
$w$	Grau de umidade
$w_f$	Grau de umidade final
$w_{nat}$	Umidade natural
$\Delta h$	Variação de altura
$\Delta t$	Variação de tempo
$\Delta u_f$	Variação de poropressão na ruptura
$\Delta s_v$	Variação da tensão vertical
$\phi'$	Ângulo de atrito efetivo
$\varepsilon_{af}$	Deformação axial na ruptura
$\varepsilon_v$	Deformação vertical
$\gamma_t$	Peso específico total
$\gamma_w$	Peso específico da água
$\nu$	Coeficiente de Poisson
$\sigma'_c$	Tensão confinante efetiva
$\sigma'_m$	Tensão efetiva média
$\sigma_v$	Tensão vertical
$\sigma'_v$	Tensão vertical efetiva
$\sigma_{v1}$	Tensão vertical no tempo inicial
$\sigma_{v2}$	Tensão vertical no tempo final
$\sigma_{vm}$	Tensão vertical média
$\sigma'_{vm}$	Tensão vertical média efetiva
ASTM	“American Society for Testing Materials”
C.I.D.	Ensaio triaxial consolidado isotropicamente drenado
C.I.U.	Ensaio triaxial consolidado isotropicamente não-drenado
CRS	“Constant rate of strain”
NBR	Norma Brasileira
OCR	Razão de pré-adensamento (“Over Consolidation Ratio”).
SIC	“Standard Incremental Consolidation”
SICu	Ensaio de adensamento com uma face drenante
U.U.	Ensaio triaxial não consolidado e não-drenado.

*“Não sois máquina. Homem é o que sois”  
(Charles Chaplin)*