

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOTECNIA E
CONSTRUÇÃO CIVIL

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MECÂNICO
DE UM SOLO EXPANSIVO DA PROVÍNCIA
PETROLÍFERA DE URUCU-AM PARA FINS DE
PAVIMENTAÇÃO

LEONARDO SEBASTIÃO DE SOUZA

GOIÂNIA

2009

LEONARDO SEBASTIÃO DE SOUZA

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MECÂNICO
DE UM SOLO EXPANSIVO DA PROVÍNCIA
PETROLÍFERA DE URUCU-AM PARA FINS DE
PAVIMENTAÇÃO**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Geotecnia e Construção Civil da Universidade Federal de Goiás para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de concentração: Geotecnia

Orientador: Prof. Dr. Gilson de F. N. Gitirana Jr

Co-orientadora: Profa. Dra. Lilian Ribeiro Rezende

**Goiânia
2009**

FICHA CATALOGRÁFICA:

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
GPT/BC/UFG**

S729a Souza, Leonardo Sebastião.
Análise do comportamento mecânico de um solo expansivo da província petrolífera de Urucu-AM para fins de pavimentação [manuscrito] / Leonardo Sebastião de Souza. - 2009.
167 f. : il., figs, tabs.

Orientador: Prof. Dr. Gilson F. N. Gitirana Jr.; Co-orientadora: Prof^a. Dr^a. Lilian Ribeiro Rezende.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil, 2009.
Bibliografia.
Inclui lista de figuras, abreviaturas, siglas e tabelas.
Apêndices.

1. Solos Não Saturados 2. Solos Expansivos 3. Pavimentos 4. Sucção I. Título.

CDU: 625.8:631.442.4



Universidade Federal de Goiás
Escola de Engenharia Civil
Programa de Pós-Graduação em Geotecnia e Construção Civil

FOLHA DE APROVAÇÃO

“ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DOS SOLOS EXPANSIVOS DA PROVÍNCIA PETROLÍFERA DE URUCÚ-AM PARA FINS DE PAVIMENTAÇÃO”

Leonardo Sebastião de Souza

Dissertação defendida e aprovada pela banca constituída pelos senhores:

Dr. Gilson de Farias N. G. Júnior (UFG)

Dr. Carlos Alberto Lauro Vargas (UFG)

Dr. João Carlos de Oliveira (IFG)

RESUMO

O estabelecimento de uma infra-estrutura de transporte é fundamental para o desenvolvimento da região denominada de província petrolífera de Urucu-AM. A construção desta infra-estrutura esbarra em varias dificuldades entre elas a escassez de materiais adequados para a construção de bases e sub-bases de pavimentos e as condições climáticas adversas, com alternância de períodos de alta pluviosidade e períodos de estiagem. Além da escassez de material granular adequado, observa-se com freqüência a presença de solos argilosos expansivos. A presença de tais solos, associada às condições freqüentemente inadequadas de umidade de compactação, resulta na ocorrência de trincas nos pavimentos, reduzindo drasticamente o seu desempenho e vida útil. Um entendimento quantitativo do problema requer a análise da interação entre o solo não saturado de superfície e a atmosfera e o estudo do comportamento mecânico (tensão-deformação) do solo não saturado. Tal entendimento passa pela determinação das variações de umidade do solo e sua variação volumétrica total. A quantificação das tensões de tração requer também o estabelecimento ou avaliação de relações constitutivas dos solos expansivos não saturados envolvidos. Foram conduzidos experimentos em laboratório com o objetivo de caracterizar o comportamento hidráulico e mecânico de solos expansivos de Urucu-AM. Inicialmente foram realizadas análises químicas, caracterização física e determinação da mineralogia, para caracterização das macro e micro-estruturas dos solos estudados. Foram executados também ensaios de caracterização geotécnica e compactação Proctor. Para o estudo do solo na condição não saturado, principal enfoque desta dissertação, foram realizados ensaios de papel filtro e de adensamento com controle de sucção. Para o ensaio de adensamento com controle de sucção foi utilizada uma prensa oedométrica especialmente desenvolvida para este fim. Como esta prensa foi possível aplicar de forma independente tensões verticais, sucção matricial e monitorar a variação de umidade e de volume do solo em estudo. As superfícies de estado de índice de vazios, grau de saturação de umidade do solo foram determinadas. Os resultados obtidos permitiram a determinação do comportamento do solo compactado durante trajetórias de molhagem.

Palavras Chave: Solos não saturados. Solos expansivos. Pavimentos. Sucção.

ABSTRACT

The establishment of transportation infrastructure is critical to the development of the Urucu-AM region, a newly developed oil exploration area in the Amazonas state. The construction of such infrastructure is challenging due to the lack of suitable materials for the construction pavement base and subbase courses and adverse weather conditions, with alternating heavy rainfall and drought periods. Besides the shortage of suitable granular material, the presence of expansive soils is often verified. The presence of expansive soils associated with inadequate moisture content during compaction, results in the occurrence of cracks in the pavements, drastically reducing its performance and lifetime. A quantitative understanding of this type of problem requires the analysis of the interaction between the unsaturated soil surface and the atmosphere and the study the mechanical behavior (stress-strain) of unsaturated soil. Such understanding requires the determination of the variations in soil moisture and total volume. The quantification of tensile stresses also requires the establishment or evaluation of the constitutive relations of the unsaturated expansive soils involved. Experiments were conducted in the laboratory with the objective of characterizing the hydraulic and mechanical behavior of expansive soils from Urucu-AM. Chemical, physical and mineralogy characterization tests were carried out for the soil. Geotechnical characterization and Proctor compaction tests and compression were performed. To study the soil in the unsaturated condition, the main focus of this work, tests were performed using the filter paper technique and the axis translation technique under oedometric conditions. For the suction controlled oedometric tests, a cell developed specially for this purpose was employed. The oedometer allows for the independent control of vertical stress and matric suction and the monitoring of the variation of moisture and total volume study. State surfaces for void ratio, degree of saturation and gravimetric moisture content were determined. The results obtained show the expected mechanical behavior of the soil under wetting paths.

Keywords: Unsaturated soils. Expansive soils. Pavements. Suction.

A Deus, meu Senhor e Salvador.

A minha amada esposa Paula e meus filhos Débora, Gustavo, Larissa e Tayná.

AGRADECIMENTOS

A Deus por mais um milagre em minha vida.

“Os que confiam no SENHOR serão como o monte de Sião, que não se abala, mas permanece para sempre” (Salmos 125:1).

Ao professor Gilson Gitirana mais que um orientador, um amigo para sempre.

A Professora Lilian coorientadora que sempre me recebeu com um sorriso e uma palavra de incentivo.

A minha esposa Paula sempre companheira.

Aos meus amados filhos Débora, Gustavo, Larissa e Tayná que mesmo não entendendo a minha ausência neste período sempre foram motivo da minha motivação.

Aos meus Pais pela preocupação e orações pela minha vida.

Ao amigo Gladsthon e sua família pelas orações e ajuda sempre nas horas mais difíceis.

Aos amigos Andre e Paulo Andre pelo apoio e incentivo.

Aos colegas da coordenação de Agrimensura do IFGO pela dispensa parcial das atividades de trabalho, o que possibilitou a realização desta dissertação de Mestrado.

Ao amigo reitor Paulo Cesar que sempre me incentivou na busca pela qualificação profissional.

Ao CNPq pelo financiamento da pesquisa.

Aos professores do GECON pelos conhecimentos transmitidos e pela relação de amizade que sempre me receberam.

Aos colegas da 1º turma de Geotecnia do mestrado do GECON: Adriane, Pedro, Nelson, Ricardo, Vinicius, Vitor, Lucas.

As amigas Alesandra e Liliane grandes parceiras.

Aos amigos Arlan e Roberto pela amizade e pela ajuda prestada.

As amigas Camilla e Rosely companheiras do dia a dia do laboratório de solos.

Aos técnicos do laboratório de solos João Jr e Elias, grandes amigos.

Aos amigos Wellington e Cesar que durante estes dois anos me substituíram a altura.

A amiga Tercilia que soube cuidar com muito zelo e carinho da filha menor Débora.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	Localização da área em estudo (Google Earth 20008)	22
Figura 2.1	Elemento de solo não saturado com fase continua de ar	26
Figura 2.2	Curvas de calibração para os papeis filtro Whatman N°42 e o Schleicher e chuell N°589 (MARINHO,1994).....	33
Figura 2.3	Posições relativas das curvas de retenção para diferentes solos (VILAR, 2000).....	36
Figura 2.4	Caracterização da curva característica segundo Fredlund, Xing e Huang(1994).....	36
Figura 2.5	Superfície constitutivas de volume e massa para uma areia artificial: (a) umidade gravimétrica; (b) índice de vazios; (c) grau de saturação; (PHAN, 2006)	40
Figura 2.6	Superfície constitutivas de volume e massa para um silte artificial: (a) umidade gravimétrica; (b) índice de vazios; (c) grau de saturação (PHAN, 2006).....	41
Figura 2.7	Superfície constitutivas de volume e massa para uma argila artificial: (a) umidade gravimétrica; (b) índice de vazios; (c) grau de saturação (PHAN, 2006)	42
Figura 2.8	Curva de compressibilidade típica de ensaio de adensamento oedométrico convencional (AGUIAR, 20008).....	46
Figura 2.9	Classificação da expansibilidade de argilominerais e materiais argilosos segundo Williams e Donaldson (1980).....	56
Figura 3.1	Ensaio de granulometria por sedimentação	62
Figura 3.2	Granulômetro a laser localizado no Laboratório de Geotecnia da UnB	63
Figura 3.3	Ensaio de compactação da metodologia MCT: (a) Equipamento de compactação; (b) Corpos de prova compactados.....	66
Figura 3.4	Carta de classificação do método das pastilhas (NOGAMI; VILLIBOR, 1994)	68
Figura 3.5	Propriedades e utilização dos grupos de solos MCT (NOGAMI; VILLIBOR, 1995)	68
Figura 3.6	Tabela de classificação TRB/AASHTO (DNER, 1996).....	70
Figura 3.7	Carta de plasticidade de Casagrande (VARGAS, 1978)	70

Figura 3.8	Ensaio de papel filtro: (a) Amostras compactadas e preparadas para o ensaio; (b) Acondicionamento das amostras para espera dos 14 dias.....	73
Figura 3.9	Prensa de adensamento, tipo Bishop, Laboratório de Geotecnia da UFG	74
Figura 3.10	Gráfico de adensamento com expansão	75
Figura 4.1	Sistema oedométrico com controle de sucção	81
Figura 4.2	Detalhes da câmara de pressão: (a) sistema montado, identificando as conexões e (b) interior da câmara, identificando o sistema de vedação e a manta de aquecimento	85
Figura 4.3	Detalhes da pedra porosa e do anel de aço	87
Figura 4.4	Detalhe do solo compactado dentro do anel oedométrico e sobre a cerâmica de alto valor de entrada de ar	88
Figura 4.5	Detalhe do cilindro pneumático	89
Figura 4.6	Detalhe do extensômetro ligado a câmara de pressão	90
Figura 4.7	Detalhe do painel de controle e suas conexões.....	91
Figura 4.8	Detalhe do sistema de aquecimento e controlador HTC 150.....	93
Figura 4.9	Detalhe do excesso de cola epóxi na pedra porosa	94
Figura 4.10	Pedra porosa rompida	95
Figura 4.11	Calibração do cilindro pneumático	98
Figura 4.12	Calibração do cilindro pneumático no laboratório da UFG.....	99
Figura 4.13	Gráfico de conversão das cargas aplicadas em Psi para Kpa.....	99
Figura 4.14	Saturação do corpo de prova compactado dentro do anel.....	105
Figura 5.1	Ensaio de granulometria com granulômetro a laser e com secagem previa (CSP).....	108
Figura 5.2	Ensaio de granulometria com granulômetro com secagem em estufa (CSE).	109
Figura 5.3	Carta de plasticidade de Casagrande (Modificado de Caputto, 1996).....	112
Figura 5.4	Curva de compactação e linhas de saturação	114
Figura 5.5	Curva de adensamento na umidade ótima	117
Figura 5.6	Curva de adensamento na umidade abaixo da ótima	118
Figura 5.7	Curva de adensamento na umidade acima da ótima	118
Figura 5.8	Curva característica mista em termos de umidade gravimétrica do solo compactado na umidade ótima.....	120
Figura 5.9	Curvas característica do solo compactado abaixo da umidade ótima em termos de umidade gravimétrica.....	121

Figura 5.10	Curvas características do solo compactado abaixo da umidade ótima em termos de grau de saturação.....	121
Figura 5.11	Curvas características do solo compactado na umidade ótima em termos de umidade gravimétrica.....	122
Figura 5.12	–Curvas características do solo compactado na umidade ótima em termos de grau de saturação.....	122
Figura 5.13	Curva característica do solo compactado acima da umidade ótima em termos de umidade gravimétrica.....	123
Figura 5.14	Curva característica do solo compactado acima da umidade ótima em termos de grau de saturação.....	123
Figura 5.15	Trajetórias de tensão dos ensaios n1, n2, n4 e n5, realizados com o solo compactado na umidade ótima.....	125
Figura 5.16	Trajetória de tensão seguida pelo ensaio n3, realizado com o solo compactado na umidade acima ótima	125
Figura 5.17	Curva característica do solo compactado na umidade ótima. Ensaio n1: curva de secagem com carga de 15 kPa. Ensaio n5: curva de molhagem com carga de 25 kPa.....	126
Figura 5.18	Plotagem dos ensaios N1 molhagem com 25 kPa, N2 molhagem com 105 kPa e N4 secagem com 15 kPa, todos moldados na umidade ótima. Índice de vazios x sucção.....	127
Figura 5.19	Plotagem dos ensaios N1 molhagem com 25 kPa, N2 molhagem com 105 kPa e N4 secagem com 15 kPa, todos moldados na umidade ótima. Grau de saturação x sucção.....	127
Figura 5.20	Plotagem dos ensaios N1 molhagem com 25 kPa, N2 molhagem com 105 kPa e N4 secagem com 15 kPa, todos moldados na umidade ótima. Grau de saturação x sucção.....	128
Figura 5.21	Curva característica de histerese combinando o ensaio do papel filtro (PF) com adensamento oedométrico com sucção (SW150).	129
Figura 5.22	Superfície de estado de índice de vazios para o solo compactado na umidade ótima	130
Figura A.1	Curva característica de secagem e umedecimento gerada pela prensa Frendlund SWC-150, logaritmo da sucção x umidade gravimétrica	144
Figura A.2	Curva característica de secagem e umedecimento gerada pela prensa Frendlund SWC-150, logaritmo da sucção x umidade volumétrica	145

Figura A.3	Curva característica de secagem e umedecimento gerada pela prensa Frendlund SWC-150, logaritmo da sucção x grau de saturação	145
Figura A.4	Gráfico de superfície para índice de vazios (PHAM, 2005	146
Figura A.5	Gráfico de superfície para umidade gravimétrica (PHAM, 2005	147
Figura A.6	Gráfico de superfície para grau de saturação (PHAM, 2005	147
Figura A.7	Vista traseira do painel de controle da prensa SWC – 150	151

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Equações para tensões efetivas em solos não saturados (FREDLUND; MORGENSTERN, 1977)	28
Tabela 2.2	Tempo de equilíbrio do papel filtro (MARINHO, 1997)	34
Tabela 3.1	Comparação entre diferentes métodos de granulometria.....	79
Tabela 3.2	Classificação das argilas em função da atividade (VARGAS, 1978	81
Tabela 4.1	Relação de pesquisadores que ao longo do tempo, usando ensaios convencionais, relacionaram a variação de volume e/ou variação de água no solo – adaptado de Pham (2005).....	82
Tabela 4.2	Tipo de pedra porosa – GCTS	86
Tabela 4.3	Deformação da câmara de pressão medida neste trabalho.....	96
Tabela 4.4	Deformação da câmara de pressão – Pham (2005	96
Tabela 4.5	Calibração da câmara de pressão – deformações em mm – executado no laboratório da UFG	97
Tabela 4.6	Calibração da câmara de pressão – deformações em mm – adaptado de Pham (2005	97
Tabela 4.7	Calibração de perda de água nas buretas sem aquecimento – ensaiado no laboratório da UFG	100
Tabela 4.8	Calibração de perda de água nas buretas com aquecimento – ensaiado no laboratório da UFG	101
Tabela 4.9	Calibração de perda de água nas buretas sem aquecimento – adaptado de Pham (2005).....	101
Tabela 4.10	Calibração de perda de água nas buretas com aquecimento – adaptado de Pham (2005).....	101
Tabela 4.11	Calibração das buretas com aplicação de carregamento vertical e sucção – leituras das buretas esquerda e direita – executado no laboratório da UFG ...	103
Tabela 4.12	Calibração das buretas com aplicação de carregamento vertical e sucção leituras das buretas esquerda e direita – adaptado de Pham (2005).....	103
Tabela 5.1	Resultado dos ensaios de granulometria com e sem defloculante	107
Tabela 5.2	Resumo dos limites de Atterberg	111
Tabela 5.3	Resumo da análise química.....	113
Tabela 5.4	Capacidade de troca cationica de alguns tipos de argila: Beaulieu (1979) e Pejon (1992).....	113
Tabela 5.5	Principais classificação do solos.....	115
Tabela 5.6	Medida da expansão no ensaio de adensamento.....	117

ABREVIATURAS E SIMBOLOS

A.T. agregação total

AASHTO *American Association of State and Highway Transportations Officials*

ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas

Am Amazonas

AVEA cerâmica de alto valor de entrada de ar

a_v coeficiente de compressibilidade

C_c índice de compressão

CD com defloculante.

C_e índice de expansão

C_r índice de recompressão

CTC capacidade de troca catiônica

CU com ultrassom

c_v coeficiente de adensamento vertical.

e índice de vazios;

G.A grau de alteração

h hora

H_d altura de drenagem.

I.S.R.M *International Society for Rock Mechanics*

IAEG Associação Internacional de Geologia de Engenharia

ISRM associação Internacional de Mecânica das Rochas

KCl cloreto de potássio

k_v coeficiente de permeabilidade vertical;

L lateríticos

Mini-MCV *Misture Condition Value*

m_v coeficiente de compressibilidade volumétrica;

N não lateríticos

RSA razão de sobreadensamento

SD sem defloculante.

S_m sucção mátrica;

S_o sucção osmótica

SPT resistência à penetração standard

S_r grau de saturação

S_t sucção total;

SU sem ultrassom.

SUCS Sistema Unificado de Classificação dos Solos

SUCS *Unified Soil Classification System*

t tempo.

T.A. teor de agregação

TRB *Transportation Research Board*

u_a pressão de ar;

UFG Universidade Federal de Goiás

UnB Universidade de Brasília

USCS unified Soil Classification System

u_w pressão neutra ou poropressão

w umidade gravimétrica

w_L limites de liquidez

w_P de plasticidade

w_S contração

γ_w peso específico da água;

Δe variação de índice de vazios;

$\Delta u(t)$ o excesso de poropressão em um tempo qualquer t .

Δu_0 o excesso de poropressão no tempo $t=0$.

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

ε_v deformação volumétrica

θ umidade volumétrica.

θ_r umidade residual

θ_s umidade de saturação

ρ_d massa específica seca do solo.

ρ_w massa específica da água.

σ tensão total aplicada;

σ' tensão efetiva;

σ'_{v0} tensão vertical efetiva geostática

σ'_{vm} tensão de sobreadensamento

σ'_{vm} A tensão de sobreadensamento

ϕ_a potencial pneumático

ϕ_g potencial gravitacional

ϕ_m potencial mátrico

ϕ_o potencial osmótico ou de soluto

ϕ_p potencial de consolidação

χ parâmetro relacionado com o grau de saturação

ψ sucção matricial

ψ_a sucção matricial que corresponde à entrada de ar;

ψ_r sucção que corresponde a umidade volumétrica residual;

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	21
1.1	OBJETIVO	21
1.2	LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	22
1.3	ESCOPO DA DISSERTAÇÃO.....	23
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	25
2.1	FASES CONSTITUINTES DO SOLO NÃO SATURADO	26
2.2	VARIÁVEIS DE ESTADO DE TENSÃO.....	27
2.3	SUCÇÃO	29
2.3.1	Componentes da sucção.....	30
2.3.2	Métodos para obter a sucção.....	31
2.3.2.1	Método do papel filtro	32
2.3.3	Curva característica de sucção.....	34
2.3.3.1	Histerese	38
2.4	RELAÇÕES CONSTITUTIVAS VOLUME-MASSA.....	38
2.5	TEORIA DO ADENSAMENTO UNIDIMENSIONAL DE TERZAGHI	43
2.5.1	Ensaio de adensamento oedométrico.....	45
2.6	CARACTERIZAÇÃO DOS SOLOS	48
2.7	CLASSIFICAÇÃO DOS SOLOS	49
2.7.1	Classificação textural ou granulométrica.....	49
2.7.2	Classificações genéticas.....	50
2.7.3	Classificações geotécnicas.....	51
2.8	SOLOS EXPANSIVOS.....	52
2.8.1	Métodos de identificação e classificação de materiais expansivos	53
2.8.1.1	Técnicas indiretas	54
2.8.1.1.1	Limites de Atterberg	54
2.8.1.1.2	Atividade.....	55
2.8.1.2	Técnicas diretas	55
2.8.1.2.1	Expansão livre	56
2.8.1.2.2	Pressão de expansão	57

3	ENSAIOS REALIZADOS E METODOLOGIAS EMPREGADAS	59
3.1	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO.....	59
3.1.1	Umidade natural e umidade higroscópica.....	60
3.1.2	Massa específica dos sólidos	60
3.1.3	Limites de Atterberg (ou de consistência)	61
3.1.4	Granulometria	62
3.1.5	Índice de atividade	65
3.2	DETERMINAÇÃO DA CURVA DE COMPACTAÇÃO.....	65
3.3	ENSAIO PARA IDENTIFICAÇÃO EXPEDITA MCT-MÉTODO DAS PASTILHAS.....	67
3.4	CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA	69
3.5	CLASSIFICAÇÃO DO SOLO.....	69
3.6	DEFINIÇÃO DOS PONTOS DE ESTUDO E PROGRAMAÇÃO DOS ENSAIOS ESPECIAIS NA CONDIÇÃO NÃO SATURADA	71
3.7	CURVA CARACTERÍSTICA - PAPEL FILTRO.....	71
3.7.1	Histerese	72
3.8	ENSAIO DE ADENSAMENTO OEDOMÉTRICO.....	73
3.8.1	Parâmetros de compressibilidade e adensamento.....	74
3.8.1.1	Determinação da tensão de pré-adensamento.....	74
3.8.1.2	Determinação da tensão de pré-expansão.....	75
3.8.1.3	Determinação dos índices recompressão, índice de compressão, índice de expansão	75
3.8.1.4	Determinação da expansão	76
3.9	ENSAIO DE ADENSAMENTO OEDOMÉTRICO COM CONTROLE DE SUCÇÃO	76
3.9.1	Comportamento mecânico	78
3.9.2	Compressibilidade do solo saturado	79
4	IMPLANTAÇÃO DO SISTEMA OEDOMÉTRICO COM CONTROLE DE SUCÇÃO	81
4.1	DESCRIÇÃO DO SISTEMA OEDOMÉTRICO COM CONTROLE DE SUCÇÃO	84
4.1.1	Câmara de pressão	84

4.1.2	Cerâmica de alto valor de entrada de ar.....	86
4.1.3	Anel de confinamento oedométrico.....	87
4.1.4	Sistema de carregamento e medição de volume total.....	88
4.1.5	Painel de controle	90
4.1.6	Sistema de aquecimento da câmara	92
4.2	PREPARAÇÃO E CALIBRAÇÃO DO SISTEMA	93
4.2.1	Montagem e saturação da pedra porosa.....	93
4.2.2	Calibração do deslocamento vertical medido devido a cargas verticais e pressão interna de ar	95
4.2.3	Calibração das cargas aplicadas pelo cilindro pneumático.....	97
4.2.4	Verificação da perda de água por condensação	100
4.2.5	Calibração da massa de água medida pelas buretas.....	102
4.2.6	Calibração das medidas da buretas em função da aplicação de pressão interna e vertical na câmara	102
4.3	PROCEDIMENTO DE ENSAIO DO SISTEMA OEDOMÉTRICO COM CONTROLE DE SUCÇÃO	103
4.3.1	Processo de saturação de corpos de prova.....	104
4.3.2	Procedimento detalhado do ensaio	105
5	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	106
5.1	CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E QUÍMICA	106
5.1.1	Caracterização física.....	106
5.1.2	Caracterização química.....	112
5.1.3	Compactação.....	113
5.1.4	Classificações, índice de atividade de Skempton e correlações granulométricas	114
5.2	COMPORTAMENTO MECÂNICO.....	116
5.2.1	Compressibilidade do solo saturado	116
5.2.2	Curva característica obtida pela técnica do papel filtro.....	119
5.2.3	Adensamento oedométrico com controle de sucção.....	124
5.2.3.1	Desempenho do equipamento.....	124
5.2.3.2	Resultados obtidos	124
5.2.4	Superfícies de estado	129

6	CONCLUSÕES	132
6.1	Conclusões com relação ao solo estudado	132
6.2	conclusões com relação ao equipamento utilizado	133
6.3	sugestões para pesquisas futuras.....	134
	Apêndice A	135
	Referências	154