

3

Materiais e Métodos

3.1

Generalidades

3.1.1

Aspectos Geológico-Geomorfológicos do Local

Ruellan (1944) descreve o litoral do Estado do Rio de Janeiro como apresentando cordões arenosos de aspecto retilíneo, estendidos entre elevações rochosas. Atrás destes cordões, formaram-se diversas lagunas.

A lagoa de Itaipu, em Niteroi, constitui uma destas típicas lagunas que, assim como as de Piratininga e Jacarepaguá, originou-se do fechamento de parte da enseada por cordões de restinga Carvalho (1980). O vale no qual a lagoa está inserida é largo na sua embocadura e reduz-se para montante em forma de funil, tendo um fundo aluvial colmatado, associado a deposições marinhas quaternárias (Silva, 1979).

Os depósitos orgânicos ali presentes tiveram suas origens nos ciclos de avanço e recuo do nível do mar, juntamente com as correntes fluvial e eólica. Deposições de matéria orgânica ao longo de séculos são evidenciadas pela presença de restos de raízes e conchas a alguns metros de profundidade (Ruellan, 1944).

Novos estudos geomorfológicos propõem, entretanto, que a região teve processos iniciais de deposição há cerca de 300.000 anos, com a primeira invasão pelo mar há cerca de 130.000 anos, e posteriores migrações de lençóis arenosos (Costa *et al.*, 2011).

3.1.2

Perfil Geotécnico

A Figura 3.1 apresenta o perfil geotécnico do local onde foi construído o aterro experimental de Camboinhas. O perfil é constituído por uma camada heterogênea de solos moles, com espessuras entre 9 e 12 m, aproximadamente, compos-

ta por turfas amorfas (desprovidas de qualquer estrutura) e fibrosas, e argilas muito orgânicas. O estrato médio é composto por argilas arenosas e siltsas, de coloração cinza clara, espessuras entre 2 e 6 m, abaixo da camada orgânica ou do estrato superior arenoso. O inferior é composto por areias grossas e compactas, de coloração clara (Russo Neto, 1980).

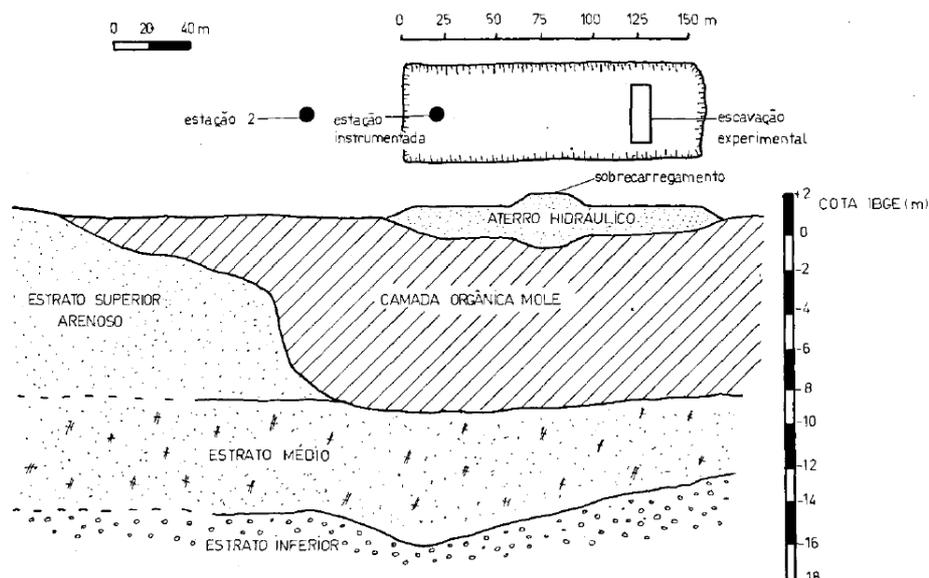


Figura 3.1 – Perfil geotécnico ao longo do eixo leste-oeste do aterro (Russo Neto, 1980)

Em 2013, realizou-se uma nova campanha de ensaios de campo e extração de amostras indeformadas, que indicaram a presença de duas camadas de solos moles sobrepostas, separadas por uma aparente lente de areia de cerca de 40 cm de espessura, na região denominada por Russo Neto (1980) e Carvalho (1980) de “camada orgânica mole”. Este perfil é apresentado na Figura 3.2, e foi determinado com base em ensaios de piezocone, descritos no item 3.3.

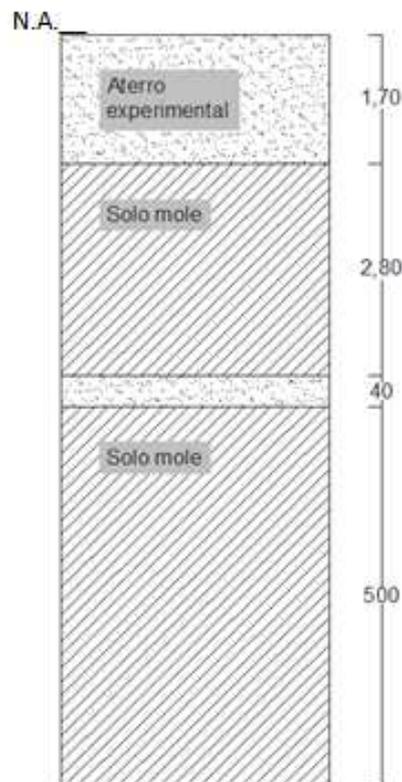


Figura 3.2 – Perfil geotécnico obtido em ensaios de piezocone, em 2013

O aterro experimental de 1977

As atividades relacionadas à execução do aterro experimental tiveram início em outubro de 1977, com a escolha do local e a definição de suas dimensões e seu posicionamento no terreno.

Decidiu-se por fazer um aterro com cerca de 50 m de largura, 150 m de comprimento e 1,70 m de altura. O aterro foi posicionado de forma que seu maior eixo (comprimento) ficasse paralelo à direção leste-oeste, conforme mostra a Figura 3.3. A figura mostra, também, as curvas de isoespessura das camadas de solo mole, em metros. Vê-se que o depósito apresentava espessuras variáveis entre 8 e 12 m.

O aterro teve início em dezembro de 1977 e foi construído em duas etapas: na primeira, executou-se a altura prevista inicialmente, de 1,70 m; na segunda, houve um acréscimo de 1 m de altura, em uma faixa de 25 m de largura, cujo eixo era paralelo à direção norte-sul. Este carregamento adicional pode ser visto no perfil geotécnico mostrado na Figura 3.1. Considerou-se que o aterro, executado desta maneira, seria representativo da obra a ser implantada (Russo Neto, 1980).

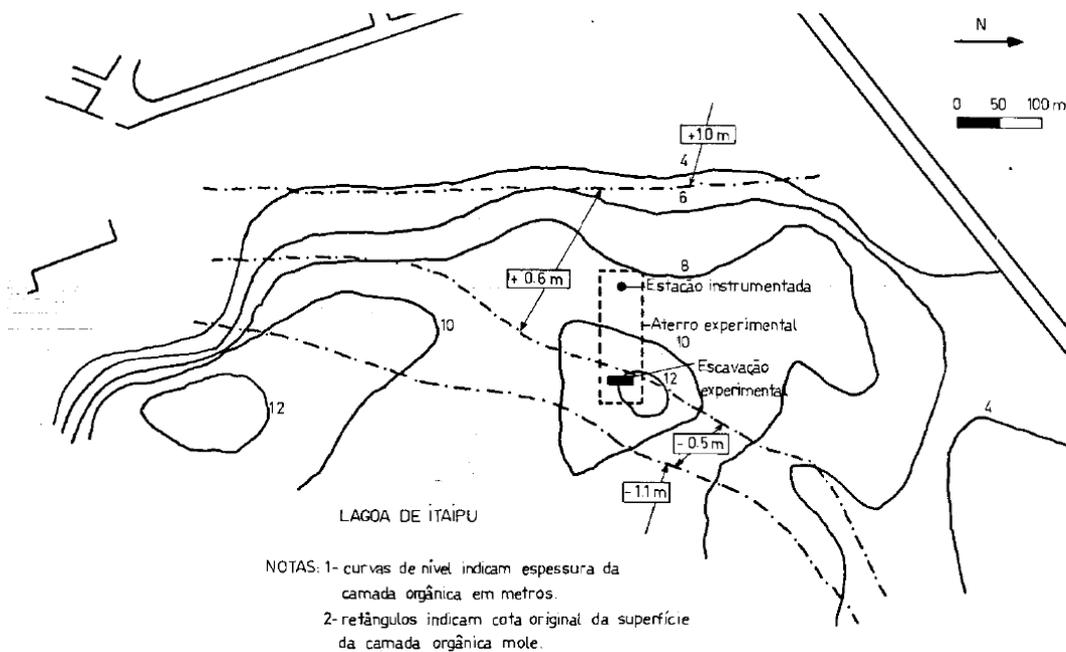


Figura 3.3 – Localização do aterro experimental (Russo Neto, 1980)

O material utilizado na construção do aterro consistiu em uma areia média, dragada do fundo e das margens da lagoa de Itaipu, com peso específico natural (γ_{nat}) de 17,5 kN/m³ e peso específico saturado (γ_{sat}) de 20,5 kN/m³ (Silva, 1979).

3.1.3 Amostragem de Campo

O procedimento de amostragem envolveu a retirada de amostras indeformadas do local onde foi executado o aterro experimental (Figuras 3.4 e 3.5).

As amostras foram extraídas no início de maio de 2013, por meio de amostradores cilíndricos de paredes finas (*Shelby*), metálicos, com pistão estacionário, de 10 cm (4”) de diâmetro. A empresa *Geoforma Engenharia Ltda.* foi a responsável pela execução dos serviços.

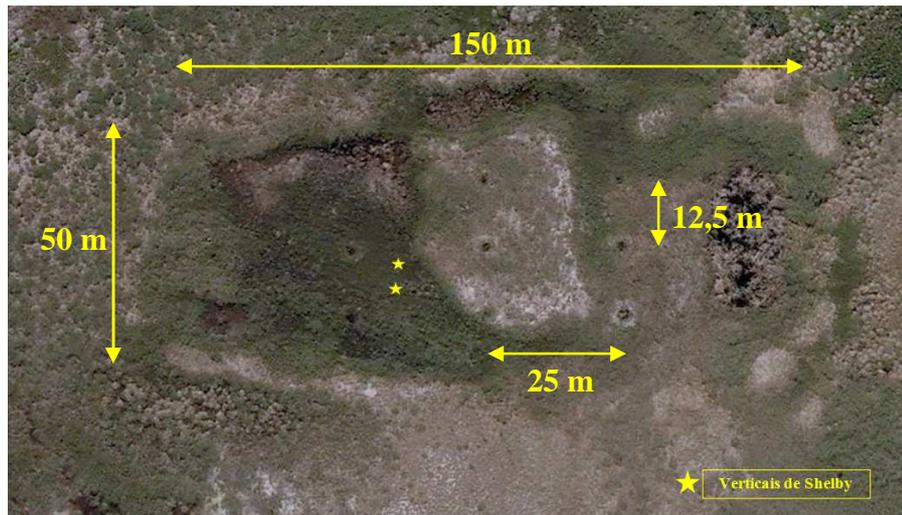


Figura 3.4 – Dimensões do aterro e do espaçamento entre placas de recalque, e local aproximado das verticais de retirada das amostras (imagem do Google Maps)

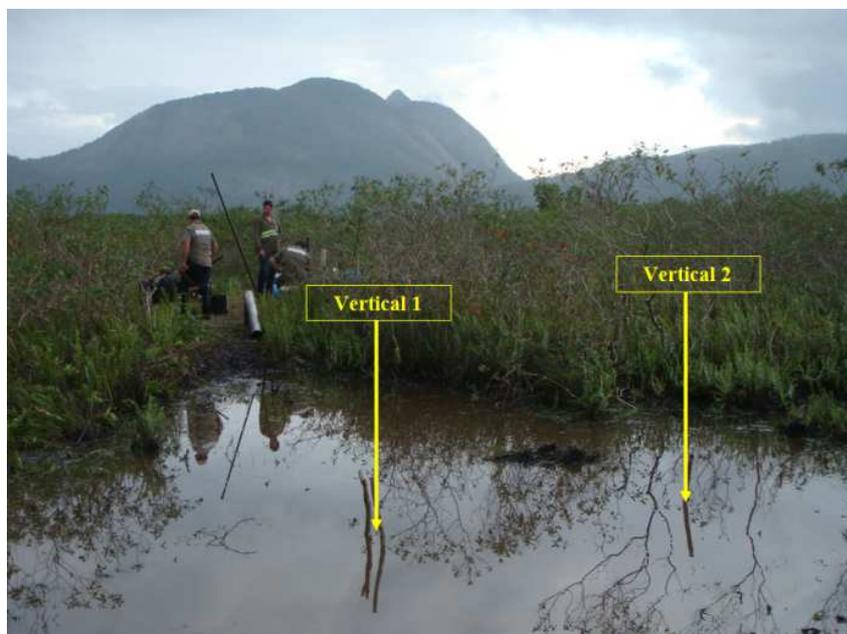


Figura 3.5 – Foto do local verticais de retirada das amostras indeformadas

O procedimento procurou seguir a melhor técnica de amostragem disponível. Os seguintes cuidados foram tomados, conforme recomendações de Ladd e DeGroot (2003), para diminuir as perturbações causadas ao material a ser coletado (Figura 3.6):

- Preenchimento do furo, até cerca de 30 cm, com lama bentonítica, para evitar o levantamento de fundo do solo remanescente;
- Cravação do tubo *Shelby* na posição vertical;

- Preenchimento do tubo *Shelby* com areia, após a retirada da amostra, para recuperações menores que 100% (todos os tubos foram preenchidos com areia);
- Colocação de uma camada fina de parafina (1 cm) entre o solo mole e a areia de preenchimento, para evitar o contato desta com o solo mole;
- Colocação de duas camadas de parafina e um tecido entre elas, para diminuir a perda de umidade da amostra, em ambas as extremidades do tubo;
- Colocação dos tubos dentro de suportes de madeira preenchidos com serragem umedecida, para o transporte até o carro;
- Proteção dos suportes de madeira através do acondicionamento destes em colchões dobrados, minimizando possíveis efeitos de amolgamento durante o transporte das amostras até o laboratório;
- Transporte até o laboratório feito com o veículo em baixa velocidade.

Foram retiradas 8 amostras, de duas verticais de sondagem. Deste total, 4 foram extraídas com a utilização de tubos *Shelby* de ferro. As outras 4 utilizaram tubos de aço inoxidável. Os tubos utilizados tinham comprimento de 60 cm, o que impossibilitou a realização de ensaios triaxiais, uma vez que a recuperação em todas as amostras foi menor que 100%, além de terem sido separados os dez primeiros e os dez últimos centímetros de cada amostra, para utilização nos ensaios de caracterização, conforme recomendado por Sandroni (1977a).



Figura 3.6 – Procedimento de amostragem
 (a): Cravação do tubo; (b) Retirada da amostra; (c) Aplicação de parafina para proteção da boca do tubo; (d) Acondicionamento e transporte até o veículo; (e) Acondicionamento para transporte ao laboratório; (f) Tubos armazenados em câmara úmida.

Ao final da bateria de amostragem, as amostras foram levadas para a câmara úmida do Laboratório de Fortificação e Construção do Instituto Militar de Engenharia do Rio de Janeiro (IME-RJ), onde permaneceram armazenadas, na posição vertical, até março de 2014, quando foram levadas para a câmara úmida do Laboratório de Geotecnia da PUC-Rio, para a execução dos ensaios.

A Tabela 3.1 reúne algumas características das amostras e dos amostradores utilizados. Os índices C_a e C_i , descritos no item 2.2.2, são, respectivamente, a “razão de área” e a “folga interna” do amostrador.

Tabela 3.1 - Algumas características dos tubos e amostras extraídas

Amostra	Furo	Profundidade (m)	Recuperação (%)	C_a (%)	C_i (%)	Material do Tubo
1	1	2,60 a 3,20	87,5	6,36	2,98	Aço inox.
2	1	3,90 a 4,50	86,7	6,43	4,61	Ferro
3	1	5,50 a 6,10	82,5	6,92	4,86	Ferro
4	1	6,50 a 7,10	83,3	6,44	2,51	Aço inox.
5	2	3,25 a 3,85	79,2	6,14	3,16	Aço inox.
6	2	7,50 a 8,10	80,0	6,43	3,32	Ferro
7	2	8,50 a 9,10	85,0	6,28	2,40	Aço inox.
8	2	9,50 a 10,10	73,3	7,14	2,75	Ferro

Como pode ser observado, C_a oscila pouco, entre 6,14 e 7,14%. Entretanto, C_i varia entre 2,40 e 4,86%. Hvorslev (1948) sugere que C_a e C_i não passem de 10% e 3%, respectivamente. O mesmo autor menciona, também, que C_i não deve ser menor que 0,5%, ou seja, deve haver uma folga interna no tubo, para minimizar o atrito lateral entre este e a amostra, no momento da cravação em campo.

3.2 Medições de Recalque

Foram realizadas medições de recalque em campo, para verificar a possível existência de deslocamentos remanescentes da execução do aterro experimental, aproximadamente 37 anos atrás.

Instalação do novo *benchmark*

Foi necessária a instalação de uma nova referência de nível profunda (*benchmark*) no local estudado, uma vez que a referência antiga, utilizada nas pesquisas anteriores, não foi localizada.

O novo *benchmark* foi instalado na região onde houve um sobrecarregamento de 1 m, à época de execução do aterro experimental, ou seja, a parte mais alta do local. Esta região não fica submersa, mesmo no período chuvoso.

A instalação foi feita no dia 15 de maio de 2014. O furo foi executado com equipamento usualmente utilizado em sondagens de simples reconhecimento. A cravação do trépano de lavagem foi manual, com auxílio do guincho do tripé, para içá-lo. Dentro do tubo-guia, o trépano retirava o solo pela introdução de água pressurizada por uma bomba (Figura 3.7). A profundidade atingida (impenetrável ao trépano) foi de 13,20 m.

Depois de atingida a profundidade impenetrável ao trépano, introduziram-se os tubos de PVC, de 50 mm (2”) de diâmetro, sendo que o tubo mais profundo (o primeiro a ser colocado no furo) foi tampado para evitar a entrada de material (Figura 3.7b). Os tubos eram conectados uns aos outros por meio de luvas de PVC, e tinham a função de proteger o tubo de aço galvanizado.

Aplicou-se uma calda de cimento na parte inferior dos tubos de PVC, anteriormente à descida dos tubos de aço galvanizado, para garantir a fixação na base do furo. Estes últimos tubos tinham 38 mm (1,5”) de diâmetro, e foram rosqueados uns aos outros (Figura 3.7c).

Por último, foi colocada a “cabeça boleada” (peça metálica, sobre a qual se apoia a mira de nivelamento, nas medições de recalque) (Figura 3.7d).

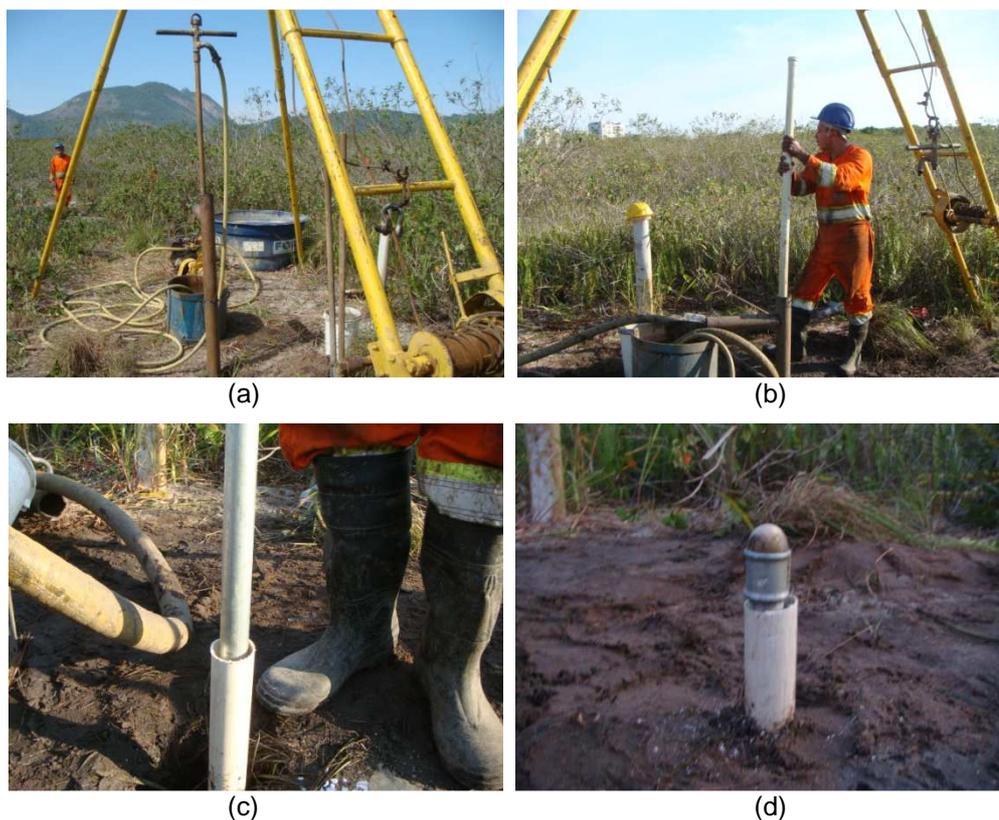


Figura 3.7 – Instalação do novo *benchmark*
 (a) Abertura do furo; (b) Descida dos tubos de PVC; (c) Descida dos tubos de aço galvanizado; (d) *Benchmark* pronto

Instalação dos pinos metálicos superficiais para medição de recalques

Após a instalação do *benchmark*, foram instalados os pinos metálicos, para acompanhamento dos recalques. Os pinos são barras de ferro de cerca de 50 cm de comprimento, com a ponta inferior em forma de “V” e, a superior, arredondada, para o posicionamento da mira de nivelamento (Figura 3.8).



Figura 3.8 – Pino metálico, à esquerda, e cabeça boleada, à direita

A instalação dos pinos metálicos foi feita da seguinte maneira:

- a) Abertura de um furo de aproximadamente 15 cm de diâmetro e 40 cm de profundidade, através do uso de cavadeira e trado manual tipo concha, ambos metálicos;
- b) Preparo e colocação de concreto magro até cerca de 2 cm abaixo do topo do furo;
- c) Colocação de tubo de PVC de 7,6 cm (3") de diâmetro e 15 cm de comprimento, centralizado no furo, de forma que uma pequena parte do tubo (2 cm) fique para fora do furo;
- d) Colocação do pino metálico no furo, o mais centralizado possível;
- e) Preenchimento do espaço restante com concreto magro.



Figura 3.9 – Instalação de pino metálico
(a) Abertura do furo; (b) Pino instalado.

Os pinos foram implantados adjacientemente a alguns pontos onde, no trabalho de Silva (1979), colocaram-se placas para a medição de recalques superficiais. Ao todo, sete pinos de medição foram implantados. A nomenclatura adotada seguiu a mesma utilizada anteriormente, ou seja, de acordo com a distância do ponto ao início do aterro, na direção oeste, e da posição do ponto em relação à direção Norte-Sul (“N”: norte; “C”: centro e “S”: sul).

Os pontos escolhidos para o monitoramento dos recalques foram: 25S, 25C, 50S, 50C, 75S e 75C. Além destes, mediram-se recalques em outro ponto, denominado de ENS.13. Este ponto é adjacente às verticais onde, em 2013, foram realizados os ensaios de campo e foram coletadas as amostras indeformadas.

Com este cenário, estabeleceu-se um circuito fechado para as medições (Figura 3.10). As vantagens deste arranjo serão discutidas a seguir.

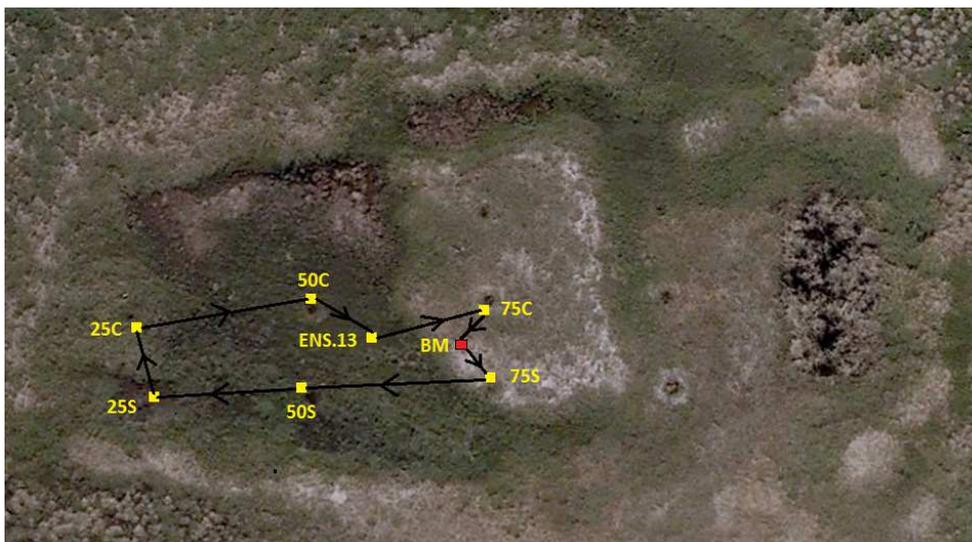


Figura 3.10 – Circuito fechado de medições (localização aproximada dos pontos)

Metodologia adotada para as medições de recalque

A metodologia adotada neste trabalho baseou-se na NBR 13133 (ABNT, 1994) e no procedimento proposto por Tassi (2014), para minimização dos erros inerentes ao processo de nivelamento.

Segundo a referida Norma, o trabalho realizado é classificado como levantamento topográfico altimétrico, ou nivelamento, que visa à determinação das posições relativas de pontos específicos a uma superfície de referência. Mais especificamente, foi realizado um nivelamento geométrico (ou nivelamento direto), definido como a medida da diferença de altura entre pontos do terreno obtida por leituras com visadas horizontais, por meio de aparelho de nivelamento, a miras posicionadas na vertical.

A adoção dos procedimentos propostos por Tassi (2014) foi importante para a minimização dos erros inerentes ao processo, pois não se sabia se os recalques ainda estavam acontecendo ou não. De fato, três cenários hipotéticos seriam possíveis:

- 1) Os recalques estariam ocorrendo, mas seriam tão pequenos que a exatidão do método não seria suficiente para medi-los;
- 2) O método teria exatidão suficiente para medir os recalques, mas estes já teriam cessado;

- 3) O método teria exatidão suficiente para medir os recalques, e os recalques continuariam acontecendo atualmente, 37 anos após a execução do aterro experimental.

Equipamentos utilizados

Existem diversos equipamentos disponíveis no mercado, com diferentes exatidões. Neste trabalho, porém, era necessário um equipamento que tivesse exatidão suficiente para medir deslocamentos, supostamente, muito pequenos.

Nos nivelamentos, foram utilizados os seguintes equipamentos (Figura 3.11):

- a) Nível óptico automático NA2 da marca Wild, de fabricação suíça;
- b) Micrômetro de placa plano-paralela, acoplado ao nível;
- c) Régua metálica (mira), com graduação em centímetros.



Figura 3.11 – Nível NA2 com micrômetro acoplado

Segundo a NBR 13133 (ABNT, 1994), os níveis ópticos são classificados de acordo com o desvio-padrão gerado em 1 km de duplo nivelamento. A Norma determina, também, que equipamentos que apresentam desvios padrões inferiores a ± 1 mm/km são classificados como equipamentos de exatidão muito alta.

Trutmann (1980), citado por Tassi (2014), menciona que a exatidão do equipamento utilizado nesta pesquisa (nível óptico e placa plano-paralela acoplada) é de $\pm 0,3$ mm/km.

O equipamento oferece leitura de cinco dígitos, sendo o sexto dígito (centésimos de milímetro) o algarismo duvidoso. Ou seja, a leitura fictícia de 383,478

significa 383 centímetros, 478 centésimos de milímetros (sendo 8 o algarismo duvidoso).

Procedimento de medição propriamente dito

As medições de recalque em Camboinhas tiveram início no dia 13 de julho de 2014, quando foi realizada a “leitura-zero”, ou seja, a determinação das cotas iniciais dos pinos metálicos em relação à cota arbitrada para o *benchmark*. Esta leitura serviu de referência para as demais.

O procedimento de medição é descrito, resumidamente, a seguir:

- a) Posiciona-se o tripé com o equipamento em uma posição equidistante dos dois pontos a serem nivelados, sendo o primeiro deles a referência de nível (*benchmark*) e, o segundo, o ponto cuja cota deseja-se determinar;
- b) Nivelam-se horizontalmente o equipamento por meio do acionamento dos parafusos de ajuste de posição (processo denominado comumente de “calagem da bolha”);
- c) Posiciona-se a mira (régua metálica) verticalmente sobre o *benchmark*. Tiras de borracha prendem a mira a um segundo tripé. Um nível de bolha fixado na parte posterior da régua garante a verticalidade da mira;
- d) Faz-se a leitura de ré no *benchmark* (BM), com seis algarismos;
- e) Gira-se o equipamento e posiciona-se a régua no pino cuja cota deseja-se determinar;
- f) Faz-se a leitura de vante. A cota do pino i (z_i) é dada por:

$$z_i = L_R - L_V \quad (3.1)$$

Onde:

- L_R : leitura de ré;
 - L_V : leitura de vante.
- g) Repetem-se os procedimentos de “a” até “f” (a este conjunto de ações dá-se o nome de “lance”), sendo ré o último ponto nivelado

como vante, até que o *benchmark* seja o ponto da última leitura de vante. A cota dos pontos seguintes é calculada pelo somatório das leituras de ré, diminuído pelo somatório das leituras de vante, até o ponto em questão.



Figura 3.12 – Execução de nivelamento, com a mira suportada por tripé metálico

Erros inerentes ao processo de nivelamento geométrico

Em um processo de nivelamento geométrico, deseja-se determinar o valor real das cotas dos pontos medidos. No caso em análise (circuito fechado), a diferença entre as cotas inicial e final do *benchmark* (visada de ré do primeiro lance e visada de vante do último lance, respectivamente) deve ser nula, por tratar-se de um ponto, teoricamente, indeslocável. Entretanto, devido a uma série de erros inerentes a este processo, obtém-se sempre uma diferença entre estes dois valores. Esta diferença é o erro do nivelamento.

Obviamente, parte deste erro pode ser gerada a cada lance da medição, que se acumula até o fechamento do circuito.

No exemplo das medições em Camboinhas, a cota inicial arbitrada para o *benchmark* foi +100,000. Entretanto, ao final de cada nivelamento, o erro acumulado ao longo dos lances fazia com que esta cota ficasse um pouco abaixo ou um pouco acima da cota arbitrada. A Tabela 3.2 apresenta os dados obtidos na segunda medição de recalques, realizada no dia 18/08/2014. O “Erro” encontrado foi de

0,106 cm. Como forma de distribuir este erro, divide-se o valor pelo número de lances e corrige-se o desnível encontrado, somando-se o valor dividido com o sinal invertido. Ou seja:

$$\text{Correção do erro} = \left(\frac{\text{erro}}{\text{n}^{\circ} \text{ de lances}} \right) \times (-1) \quad (3.2)$$

Tabela 3.2 – Correção das cotas dos pontos nivelados (valores em cm)

Lance de Leituras		Leitura		Desnível (R-V)	Cota Não Corrigida	Desnível Corrigido	Cota Corrigida
Pino de Ré (R)	Pino de Vante (V)	Ré (R)	Vante (V)				
BM	75S	386,621	400,573	-13,952	86,048	-13,965	86,035
75S	50S	354,554	399,873	-45,319	40,729	-45,332	40,703
50S	25S	397,988	396,091	1,897	42,626	1,884	42,586
25S	25C	414,043	403,063	10,980	53,606	10,967	53,553
25C	50C	386,141	384,089	2,052	55,658	2,039	55,592
50C	ENS.13	381,810	402,709	-20,899	34,759	-20,912	34,680
ENS.13	75C	405,211	370,600	34,611	69,370	34,598	69,277
75C	BM	396,370	365,634	30,736	100,106	30,723	100,000
Erro:				0,106	Correção:		-0,013

A metodologia proposta por Tassi (2014) é baseada na tentativa de mitigar os principais erros inerentes ao processo de medição de recalques, sejam eles provenientes de falhas no equipamento de medição, influências do meio ambiente, falhas humanas, etc. Estes erros e as medidas para minimizá-los são apresentados na Tabela 3.3.

Todas as recomendações que constam nesta tabela foram seguidas. Entretanto, houve necessidade de se fazerem algumas leituras após as 10 horas da manhã, quando as temperaturas são mais elevadas. O fabricante do equipamento de nivelamento, porém, afirma que este não sofre influência dos efeitos de temperatura (Wild-Heerbrugg, 1965).

O nível foi calibrado em 2013 e, em 2014, foi feita uma revisão dos mecanismos do equipamento, e uma limpeza das peças componentes.

Com relação ao erro número 5 da Tabela 3.3, além de repetirem-se as leituras, o autor recomenda que as cores da escala da mira devam, sempre que possível, contrastar com a cor preta do fio nivelador do equipamento de medição utilizado. A maior parte das escalas é fabricada nas cores vermelha e preta (Figura

3.13a). A cor preta, conforme mostra a Figura 3.13b, dificulta a leitura por parte do operador.

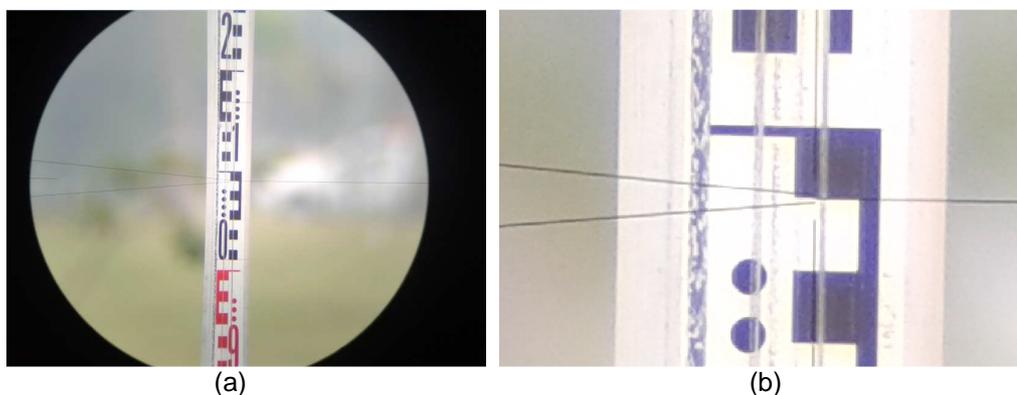


Figura 3.13 – Visada em campo
(a) Visão geral do observador; (b) Contraste ruim entre o fio nivelador do equipamento e a escala da mira

Esta dificuldade é contornada quando se tem uma cor, na mira, que contraste com a cor do fio nivelador do equipamento (Figura 3.14). A velocidade dos nivelamentos aumenta, uma vez que menos repetições de leitura são feitas.

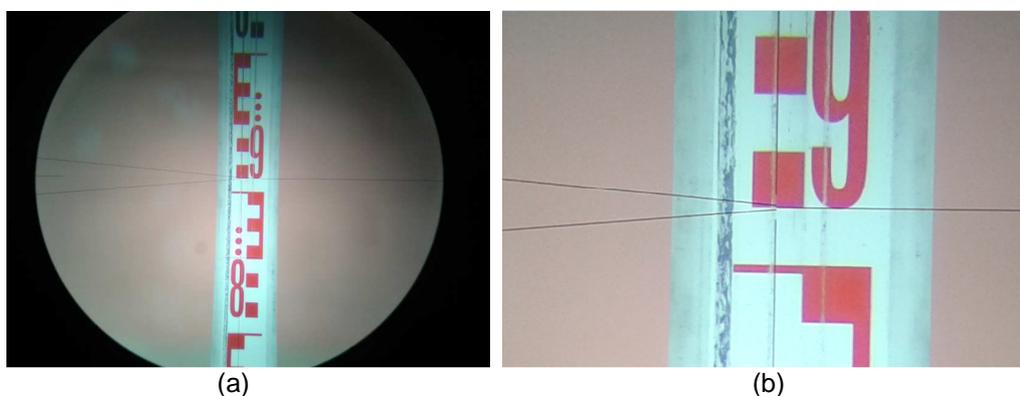


Figura 3.14 – Visada em campo
(a) Visão geral do observador; (b) Contraste adequado entre o fio nivelador do equipamento e a escala da mira

Tabela 3.3 – Erros inerentes ao processo de nivelamento geométrico - adaptado de Tassi (2014)

ERRO		ORIGEM DO ERRO	MEDIDA(S) PARA MINIMIZÁ-LO
1)	Verticalidade do eixo principal	Aparelho de nivelamento	- Calagem adequada do nível de bolha - Calibração periódica do aparelho
2)	Colimação vertical	Aparelho de nivelamento	- Calibração periódica do aparelho - Posicionar o aparelho em ponto equidistante dos pontos a serem nivelados (Método das Visadas Iguais)
3)	Erro de curvatura terrestre	Causas naturais: curvatura da Terra	- Minimizar, se possível, a distância entre aparelho e mira - Posicionar o aparelho em ponto equidistante dos pontos a serem nivelados (Método das Visadas Iguais)
4)	Refração atmosférica e reverberação	Causas naturais: variação da densidade do ar por mudanças na temperatura	- Para evitar a reverberação, as visadas devem ser feitas acima de 50 cm do ponto nivelado - Posicionar o aparelho em ponto equidistante dos pontos a serem nivelados (Método das Visadas Iguais)
5)	Pontaria	Causas humanas	- Aumentar a quantidade de leituras
6)	Verticalidade da mira	Causas humanas	- Sistema tripé-mira com nível de bolha acoplado
7)	Índice e graduação da mira	Mira	- Utilizar a mesma mira na jornada de medições - Calibração da mira
8)	Variação de temperatura	Mira	- Realizar leituras antes das dez horas da manhã

3.3 Ensaio de Campo

Com o objetivo de se obter novas informações sobre o depósito de Camboinhas, como a estratigrafia atual, realizou-se uma campanha de ensaios de campo no local do aterro experimental, em março de 2013.

Nesta campanha, foram realizadas:

- 4 verticais de ensaios de piezocone (CPTu);
- 1 vertical de ensaios de dissipação em piezocone;
- 1 vertical de ensaios de palheta (*vane test*).

Os locais onde foram realizados estes ensaios estão mostrados, em planta, na Figura 3.15. Pode-se observar que os ensaios de campo foram realizados próximos às duas verticais de extração das amostras indeformadas.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1313456/CA

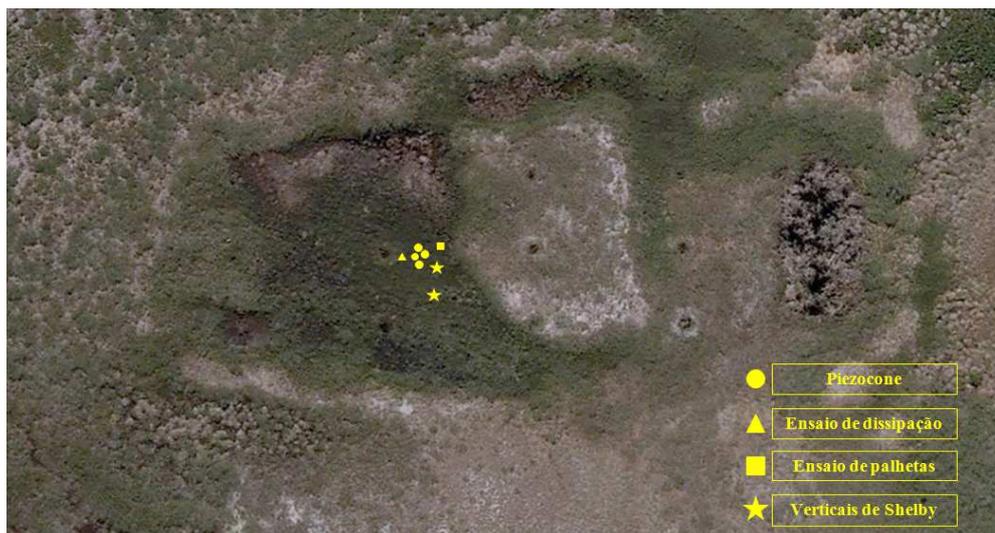


Figura 3.15 – Ensaio de campo – planta (localização aproximada dos pontos)



Figura 3.16 – Ensaio de palheta e piezocone em andamento

- **Ensaio de piezocone**

Os ensaios foram realizados em quatro verticais diferentes, sendo uma para cada velocidade de cravação adotada (Tabela 3.4).

Tabela 3.4 – Velocidades de cravação da ponteira cônica do ensaio de piezocone

Vertical de ensaio	Velocidade de cravação (mm/s)	Classificação quanto à velocidade de cravação
1ª	2	Muito lenta
2ª	6	Lenta
3ª	20	Normal
4ª	58,4	Rápida

Nestes ensaios, foram medidas as poropressões na base do cone (u_2), somente (Figura 3.17).



Figura 3.17 – Ponteira cônica com pedra porosa na base do cone (medições de u_2)

- **Ensaio de dissipação**

Foram realizados quatro ensaios de dissipação, em uma vertical, nas profundidades de 3,50, 4,50, 5,50 e 6,80 m.

- **Ensaio de palheta**

Os ensaios de palheta foram realizados em sete profundidades diferentes, iniciando na profundidade de 2,50 m e terminando na profundidade de 8,50 m, com ensaios intermediários realizados a cada metro.

3.4 Ensaio de Laboratório

A etapa de ensaios de laboratório contemplou a realização de ensaios de caracterização e adensamento. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Geotecnia da PUC-Rio, entre março de 2014 e fevereiro de 2015.

Apesar da consistência mole e do elevado teor de umidade das amostras, não houve muitos empecilhos na realização dos ensaios. Não foram encontradas conchas, e a matéria orgânica presente (galhos, folhas, etc.) estava bastante fragmentada, não sendo necessária, portanto, a utilização de equipamentos cortantes, conforme relatado por Carvalho (1980).

O elevado teor de material orgânico das amostras dificultou a execução dos ensaios de determinação dos limites de consistência e da massa específica dos grãos do solo (G_s) de algumas amostras, fazendo com que os tempos de ensaio fossem aumentados, devido à desagregação do material e à dificuldade em se retirar o ar das amostras contidas no picnômetro, respectivamente.

A moldagem dos corpos-de-prova dos ensaios de adensamento também não apresentou maiores complicações. Alguns corpos-de-prova precisaram ser preenchidos com o solo do restante da amostra, devido a irregularidades ocasionadas pela presença de restos de matéria orgânica. Algumas amostras aparentavam, também, certo grau de ressecamento, possivelmente por perda de umidade dentro da câmara úmida.

3.4.1 Caracterização

Os ensaios de caracterização realizados foram:

- a) Determinação do Limite de Liquidez (ABNT, 1984a);
- b) Determinação do Limite de Plasticidade (ABNT, 1984b);
- c) Análise Granulométrica (ABNT, 1984d);
- d) Determinação da Massa Específica dos Grãos do Solo (ABNT, 1984c);
- e) Determinação do Teor de Matéria Orgânica do Solo (ABNT, 1996).

Não foram realizados ensaios mineralógicos ou químicos nas amostras. Entretanto, Carvalho (1980) apresentou resultados de ensaios de difratometria de raios-x, realizados em amostras de quatro profundidades distintas (0,65 m, 1,80 m, 4,68 m e 6,90 m). O material utilizado, obtido de ensaios de adensamento, foi deixado secar ao ar e, então, destorroado. Eliminou-se a matéria orgânica e, por fim, prepararam-se as lâminas para a difratometria. Os resultados indicaram a presença de quartzo e caulinita, em todas as amostras. Estes resultados estão de acordo com os apresentados por Massad (2009).

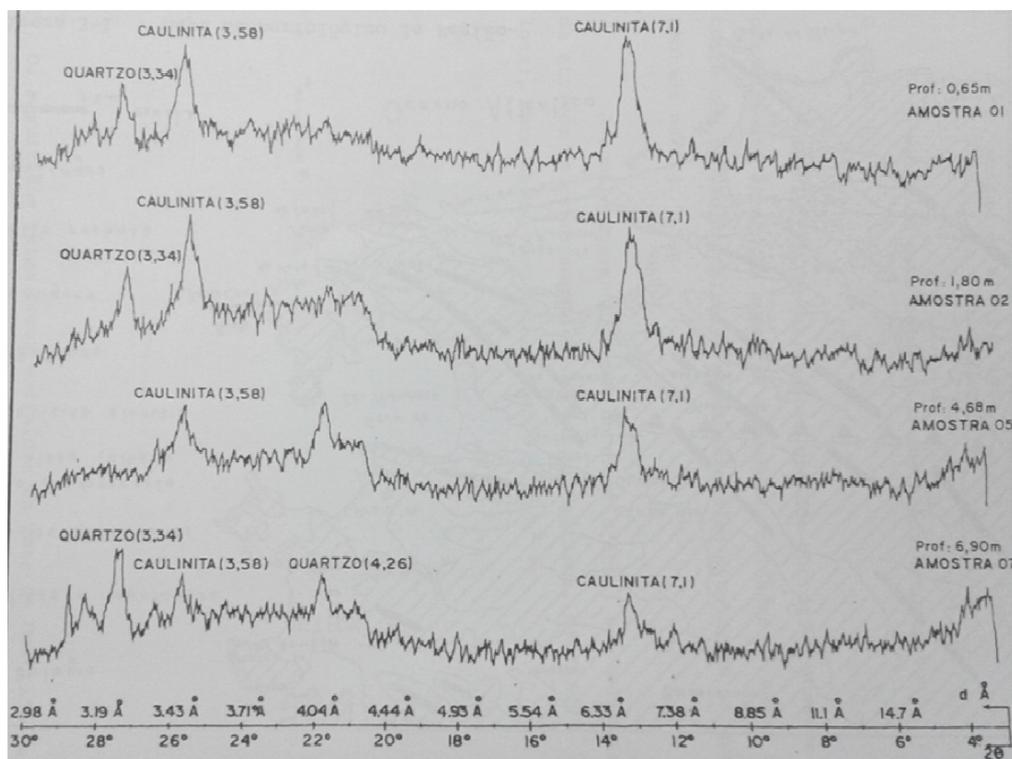


Figura 3.18 – Difratometria de Raios-X (Carvalho, 1980)

Os ensaios para a determinação dos limites de consistência das amostras foram realizados sem secagem prévia das mesmas, conforme recomendações de Bjerrum (1973) e Ladd e DeGroot (2003). Na realização de ensaios de limite de liquidez, por exemplo, devem-se obter, primeiramente, valores menores do número de golpes da concha de Casagrande, necessários para fechar a ranhura de 13 mm. Com a perda de umidade ao longo do ensaio, o número de golpes aumenta.

Chama-se atenção para o fato de que, devido ao elevado teor de matéria orgânica de algumas amostras, observou-se que o material não se misturava, rapidamente, à água destilada, devido à baixa massa específica das partículas (Figura

3.19). A mistura ocorria somente após certo tempo de aplicação do vácuo, para a retirada do ar da amostra.



Figura 3.19 – Amostra de solo orgânico sobrenadando a água destilada

A determinação do teor matéria orgânica foi realizada de acordo com a NBR 13600 (ABNT, 1996), considerando-o igual à perda por ignição (PPI). Esta é obtida colocando-se a amostra em uma mufla, a 440 ± 5 °C. A amostra ensaiada deve ser previamente seca em estufa a 105 ± 5 °C, por 24 horas.

3.4.2 Adensamento

Neste trabalho, foram realizados 28 ensaios de adensamento, os quais foram separados em dois tipos: ensaios convencionais, com carregamentos incrementais a cada 24 horas, e ensaios de adensamento não convencionais, cujas amostras foram carregadas até a tensão vertical efetiva de campo e, daí em diante, foram deixadas adensar sob esta tensão por certo período de tempo, para avaliação dos efeitos da compressão secundária.

Para cada uma das oito amostras *Shelby* ensaiadas, foram realizados um ensaio de adensamento convencional e dois (ou três) ensaios de adensamento não convencional, conforme a Tabela 3.5. A razão pela qual foi realizado um ensaio especial a menos nas amostras 1, 3, 4 e 5, foi a indisponibilidade, na ocasião, de duas prensas de adensamento, das oito prensas do laboratório.

As baterias de ensaios realizados foram quatro. Cada bateria consistiu na moldagem de seis (ou oito) corpos-de-prova, de dois amostradores *Shelby*. Na primeira, foram realizados os ensaios nas amostras 6 e 8. Na segunda, foram en-

saiadas as amostras 2 e 7. Na terceira, as amostras 1 e 3, e, por último, na quarta bateria, foram ensaiadas as amostras 4 e 5.

Tabela 3.5 – Número de ensaios de adensamento realizados por amostra

Ensaio\Amostra	1	2	3	4	5	6	7	8
Adens. convencional	1	1	1	1	1	1	1	1
Adens. não convenc.	2	3	2	2	2	3	3	3

Nomenclatura adotada para os ensaios

Os ensaios de adensamento foram nomeados da seguinte maneira: primeiro, as letras “AD”, iniciais de “adensamento”; em seguida, o número da amostra, variando de 1 a 8; por último, o número do ensaio, variando de 1 a 4, de acordo com o tipo de ensaio (convencional: 1; não convencional: 2 a 4). Exemplos:

- Ensaio convencional na amostra 7: AD-7.1;
- Segundo ensaio não convencional na amostra 4: AD-4.2.

Procedimento de preparo dos corpos-de-prova

Após as etapas de retirada das amostras em campo, armazenamento e transporte até o laboratório da PUC-Rio, o procedimento de preparo dos corpos-de-prova seguiu as recomendações de Ladd e DeGroot (2003), que determinam que o tubo *Shelby* deva ser serrado, para evitar o amolgamento causado pelo método de extrusão da amostra utilizado até então.

A sequência de atividades foi a seguinte:

- a) Retirada da parafina e do pano umedecido, colocados nas pontas do tubo *Shelby* com o objetivo de diminuir a perda de umidade da amostra. A parafina e o pano umedecido eram retirados somente em uma das pontas do tubo;
- b) Posicionamento do tubo e marcação do diâmetro a ser serrado, com caneta do tipo “*pilot*”, por meio da fixação de uma abraçadeira metálica no tubo, para a marcação. Procurou-se fazê-la de forma que a parte serrada ficasse perpendicular ao eixo vertical do tubo;
- c) Serradura manual do tubo com serra arco, deixando somente um pequeno espaço sem serrar, para a passagem do fio metálico, que

- desprende a amostra contida na porção serrada do solo remanescente no tubo;
- d) Colocação da porção serrada sobre uma peça plástica de diâmetro um pouco inferior ao diâmetro interno do tubo, que auxilia na extração do solo durante a moldagem do corpo-de-prova;
 - e) Colocação do anel metálico biselado no centro da porção de solo. O ideal é sempre utilizar a região central da amostra para a moldagem do corpo-de-prova, por se tratar, teoricamente, da parte menos afetada (amolgada) pelos procedimentos de amostragem;
 - f) Com o anel posicionado, faz-se uma leve pressão, para que este penetre alguns milímetros no solo (até que o solo exerça uma resistência maior à penetração do anel);
 - g) Retirada do excesso de material que fica para fora do anel, com o auxílio do fio metálico. Parte deste material serviu para a determinação da umidade da amostra. O restante foi armazenado em sacos plásticos, para posterior utilização em ensaios de caracterização;
 - h) Repetem-se os dois últimos passos até que o anel penetre totalmente no solo;
 - i) Retira-se o excesso de solo em torno do anel biselado, fazendo com que o solo fique contido exatamente com a mesma altura do anel;
 - j) Pesa-se a amostra moldada (solo e anel), colocando-a, logo em seguida, na célula de adensamento.

Ressalta-se que os dez primeiros e os dez últimos centímetros de cada amostra não foram utilizados para a moldagem de corpos-de-prova de ensaios de adensamento. Este material foi utilizado somente nos ensaios de caracterização. Além disso, os anéis biselados e os contatos das demais peças das células de adensamento eram cobertos com uma fina camada de vaselina, para minimizar o atrito durante a moldagem e o ensaio.

Todos os corpos-de-prova dos ensaios de adensamento foram moldados dentro da câmara úmida do Laboratório de Geotecnia da PUC-Rio, para minimizar as perdas de umidade.

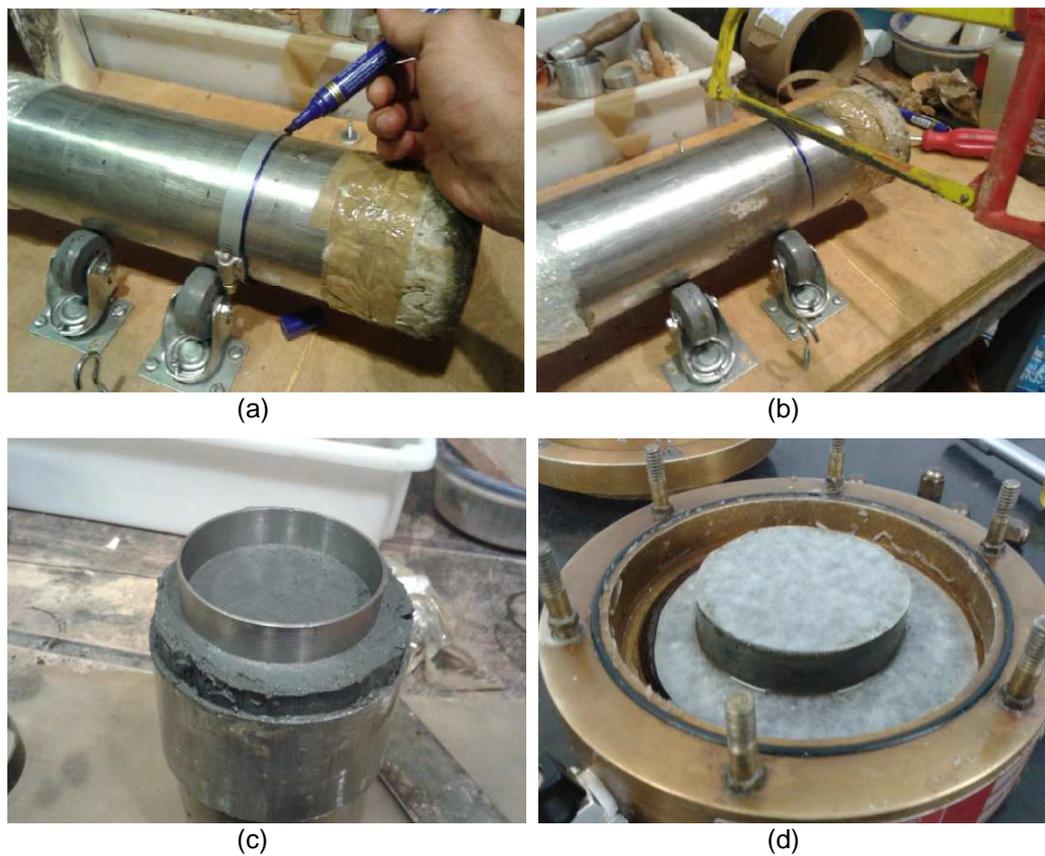


Figura 3.20 – Moldagem do corpo-de-prova do ensaio de adensamento
 (a) Fixação no torno; (b) Marcação da porção a ser serrada; (c) Posicionamento do anel biselado; (d) Corpo-de-prova moldado

Aparelhagem utilizada

Os ensaios foram realizados em prensas do tipo *Bishop*, fabricadas pela *Ronald-Taylor*, utilizando células de adensamento do tipo “*fixed-ring*” (Figura 3.21).

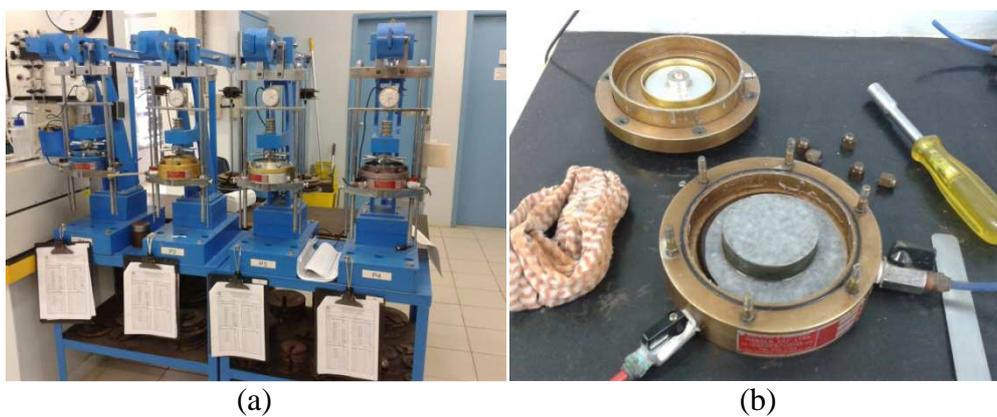


Figura 3.21 – (a) Prensas de adensamento; (b) Célula de adensamento

As prensas apresentam relação mecânica de 10:1, ou seja, o peso aplicado no solo é dez vezes maior que o peso colocado no suporte da máquina, na sua parte posterior.

Há, também, um sistema de nivelamento do braço de aplicação da carga, que permite ajustar o nível do braço sem alterar a leitura no extensômetro. Os extensômetros das prensas apresentam resolução de 0,01 mm, ou seja, cada volta no ponteiro maior representa um deslocamento vertical de 1 mm do corpo-de-prova.

Chama-se atenção para a constante verificação do nível do braço de alavanca da prensa, de fundamental importância para o andamento do ensaio: devido à elevada compressibilidade dos solos moles, este nivelamento deve ser verificado com frequência durante, pelo menos, a primeira hora após o carregamento, principalmente quando a carga aplicada for elevada.

Caso o braço encoste-se ao apoio traseiro (Figura 3.22), o solo receberá a carga, mas as leituras não poderão ser feitas e, assim, o ensaio deverá ser interrompido. O braço deve ficar sempre nivelado, para a correta aplicação da carga.



Figura 3.22 – Braço de alavanca da prensa de adensamento impedido de se deslocar pelo apoio de segurança

As amostras *Shelby* eram de 10 cm de diâmetro (4”). Na moldagem dos corpos de prova dos ensaios, foram utilizados anéis metálicos de 7 cm de diâmetro, aproximadamente. Estes anéis são biselados em sua ponta de cravação, para diminuir a perturbação causada na amostra, no ato de cravação.

Também com o objetivo de diminuir perturbações no solo e atritos diversos, aplicou-se vaselina no anel metálico e em algumas partes das células de adensamento.

Metodologia adotada nos ensaios de adensamento convencionais

Os ensaios de adensamento convencionais procuraram seguir o determinado pela NBR 12007 (ABNT, 1990), com etapas de carregamento de 24 horas de duração e leituras dos deslocamentos nos tempos 0 (leitura inicial), 6, 15 e 30 segundos, 1, 2, 4, 8, 15 e 30 minutos, 1, 2, 4, 8 e 24 horas. A leitura de 24 horas correspondia, portanto, à leitura zero da próxima etapa.

A sequência de carregamentos adotada para os ensaios convencionais variou entre as quatro primeiras e as quatro últimas amostras ensaiadas. Os ensaios nas amostras 2, 6, 7 e 8 não tiveram a etapa intermediária de carregamento entre a carga de assentamento (1,20 kPa) e a carga seguinte (aproximadamente 10 kPa). Esta carga intermediária (aproximadamente 6 kPa) foi adotada nos ensaios 1, 3, 4 e 5. Este procedimento é recomendado em ensaios de adensamento em solos moles, para uma melhor definição da curva de compressibilidade.

A carga inicial de aproximadamente 1,20 kPa, adotada em todos os ensaios, teve a finalidade de uniformizar o contato entre o corpo-de-prova e o “cap” da célula de adensamento.

Procurou-se, nas etapas seguintes, carregar o solo com cargas dobradas em relação à última carga aplicada, ou seja, a razão de incremento de carga ($\Delta\sigma'/\sigma'$) foi igual a 1. Este procedimento mostrou-se adequado para a determinação da tensão de sobreadensamento.

Os ensaios foram separados em três etapas principais:

- a) Carregamento inicial em etapas, até atingir-se cerca de 320 kPa. Este valor foi estimado como sendo razoavelmente maior do que a tensão de pré-adensamento de todas as amostras, e mostrou-se adequado;
- b) Descarregamento até a tensão vertical de 10 kPa ou 20 kPa. As quatro primeiras amostras ensaiadas (amostras 2, 6, 7 e 8) foram descarregadas até a tensão de 10 kPa, sendo que cada etapa de descarregamento durou apenas 30 minutos. Passados estes 30 minutos,

a amostra era carregada para 20 kPa, novamente, voltando à etapa de recarregamento, explicada no item “c”, adiante.

As quatro últimas amostras ensaiadas (amostras 1, 3, 4 e 5) foram descarregadas até a tensão de 20 kPa, e cada etapa de descarregamento durou 24 horas. Passadas 24 horas, a amostra era carregada para 40 kPa, novamente, voltando à etapa de recarregamento, explicada no item “c”, adiante.

A justificativa para esta mudança foi que o descarregamento de apenas 30 minutos poderia subestimar o valor do índice de recompressão (C_r);

- c) Recarregamento, passando pelas mesmas etapas do carregamento inicial, atingindo, entretanto, cerca de 640 kPa, para que a reta virgem pudesse ser novamente atingida.

Após estas três etapas, procedia-se ao descarregamento final, em pelo menos três etapas, as quais duraram, para todos os ensaios, apenas 30 minutos.

A Tabela 3.6 resume os carregamentos adotados, indicando as tensões efetivas aplicadas em cada etapa, cujos valores para as amostras 1, 3, 4 e 5 foram determinados pela aferição dos pesos de laboratório aplicados à prensa de adensamento, em balança. Os pesos aplicados nos ensaios 2, 6, 7 e 8 não foram aferidos: a carga aplicada representa a massa nominal do objeto.

Metodologia adotada nos ensaios de adensamento não convencionais

Os ensaios de adensamento não convencionais procuraram estudar o comportamento dos solos sob uma tensão vertical efetiva aproximadamente igual à de campo, constante após os carregamentos iniciais, estimada com base no perfil geotécnico apresentado na Figura 3.2. O objetivo principal foi determinar um valor representativo para o coeficiente de adensamento secundário (C_a).

No total, foram realizados 20 ensaios, da seguinte maneira: carregava-se a amostra, seguindo as etapas de 24 horas citadas anteriormente, até que sua tensão vertical efetiva de campo fosse atingida. As amostras eram, então, deixadas adensar sob esta tensão, fazendo-se leituras diárias dos deslocamentos. A Tabela 3.7 resume as etapas de carregamento de cada ensaio. As amostras 6 e 8 foram carre-

gadas, erroneamente, a tensões muito maiores que as tensões de campo e, por isso, os resultados destes ensaios foram desconsiderados.

Tabela 3.6 – Sequência de carregamentos, em kPa, dos ensaios convencionais

Etapa	Amostra							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1 ^a	1,14	1,20	1,24	1,22	1,21	1,20	1,20	1,20
2 ^a	5,95	9,62	6,05	6,03	6,02	9,62	9,62	9,62
3 ^a	10,82	19,24	10,86	10,79	10,82	19,24	19,24	22,84
4 ^a	19,33	39,67	19,36	19,32	19,35	39,67	39,67	43,28
5 ^a	39,84	79,35	39,89	39,85	39,89	79,35	79,35	82,95
6 ^a	80,80	158,69	80,78	79,55	79,64	159,89	158,69	163,50
7 ^a	160,17	319,79	160,33	160,31	160,25	319,79	319,79	323,40
8 ^a	320,33	158,69	320,47	320,27	320,25	159,89	158,69	163,50
9 ^a	160,17	79,35	160,33	160,31	79,64	79,35	79,35	82,95
10 ^a	80,80	39,67	80,78	79,55	39,89	39,67	39,67	43,28
11 ^a	39,84	19,24	39,89	39,85	19,35	19,24	19,24	22,84
12 ^a	19,33	9,62	19,36	19,32	39,89	9,62	9,62	13,22
13 ^a	39,84	19,24	39,89	39,85	79,64	19,24	19,24	22,84
14 ^a	80,80	39,67	80,78	79,55	160,25	39,67	39,67	43,28
15 ^a	160,17	79,35	160,33	160,31	320,25	79,35	79,35	82,95
16 ^a	320,33	158,69	320,47	320,27	640,36	159,89	158,69	163,50
17 ^a	640,37	319,79	640,58	640,23	79,65	319,79	319,79	323,40
18 ^a	309,51	640,78	320,47	320,27	61,50	640,78	640,78	644,39
19 ^a	69,98	319,79	80,78	79,55	44,63	319,79	319,79	323,40
20 ^a	8,51	158,69	19,36	39,85	-	159,89	158,69	163,50
21 ^a	-	79,35	-	-	-	79,35	79,35	82,95
22 ^a	-	39,67	-	-	-	39,67	39,67	43,28
23 ^a	-	19,24	-	-	-	19,24	19,24	22,84
24 ^a	-	9,62	-	-	-	9,62	9,62	13,22

Tabela 3.7 – Sequência de carregamentos, em kPa, dos ensaios não convencionais

Etapa	Amostra							
	1	2	3	4	5	6*	7	8*
1 ^a	1,26	1,20	1,26	1,26	1,23	1,20	1,20	1,25
2 ^a	6,06	7,21	6,06	6,06	6,04	6,00	9,61	9,77
3 ^a	10,87	14,41	10,86	10,85	10,84	19,21	21,62	19,17
4 ^a	16,83	27,63	19,27	19,33	16,89	39,62	45,65	39,64
5 ^a	25,24	-	33,67	37,32	25,39	79,23	-	79,23
6 ^a	-	-	-	-	-	120,05	-	162,09

*Carregamentos incorretos – ensaios foram descartados