4.
Atividades em campo

4.1
Considerações iniciais

Almeida e Marques (2010) apontam que a finalidade da campanha de ensaios é a obtenção de parâmetros geotécnicos, mas que os ensaios de campo e laboratório apresentam vantagens e desvantagens sendo, por isso, complementares. Assim, é comum a realização de ilhas de investigação em verticais contíguas. Neste capítulo passa-se a descrever os ensaios executados na ilha implantada no Local 1 e os demais ensaios nos Locais 2 e 3, conforme apresentado no item 3.5. A presente campanha consistiu de:

(i) 6 verticais de CPTu;
(ii) 2 verticais para ensaios de dissipação
(iii) 1 vertical de ensaio de palheta;
(iv) 1 poço para monitoramento de nível d'água coleta de água
(v) 2 verticais para coleta de amostras indeformadas tipo "Shelby".

A figura 4.1 mostra a posição dos ensaios CPTu e palheta no Local 1.

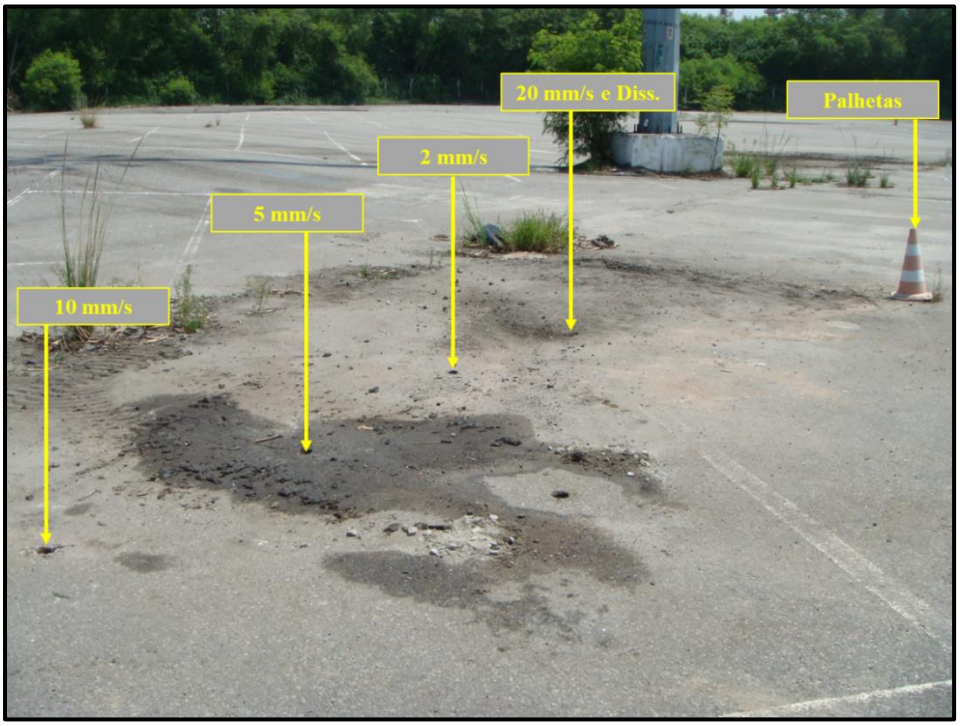


Figura 4.1 – Localização dos ensaios realizados no Local 1

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1212881/CA

Embora a coleta de amostras indeformadas seja uma atividade cujo foco é a obtenção de material para ensaio em laboratório, os cuidados durante a amostragem em campo são tão importantes para a qualidade dos resultados quanto os necessários durante a moldagem dos corpos de prova em laboratório. Portanto, apesar de não ser um ensaio propriamente dito, esta etapa reveste-se das características e cuidados comuns aos ensaios realizados em campo. Por esse motivo decidiu-se descreve-la no presente capítulo ao invés de faze-lo naquele relativo aos ensaios de laboratório.

4.2
Ensaios de piezocone (CPTu) e ensaios de dissipação

De acordo com Schnaid e Odebrecht (2012), o ensaio de piezocone, conhecido pela sigla CPTU (piezoCone Penetration Test) caracteriza-se internacionalmente como uma das mais importantes ferramentas de prospecção geotécnica, e os resultados de ensaios podem ser utilizados para a determinação estratigráfica de perfis de solos, a determinação de propriedades dos materiais prospectados, particularmente em depósitos de argilas moles. Resumidamente, o ensaio consiste em cravar no terreno, à velocidade constante, uma peça metálica com ponta em formato cônico, enquanto transdutores de poropressão e células de carga medem continuamente a resistência de ponta necessária (q_c), a resistência por atrito lateral (f_s) e a poropressão gerada na cravação (u), que são registrados em um sistema de aquisição de dados. Outra vantagem do ensaio é permitir que sejam feitas paradas programadas na cravação para que se possa observar a evolução da dissipação do excesso de poropressão gerado, e os resultados desse ensaio podem ser usados para se estimar o coeficiente de adensamento do solo. O equipamento de cravação deve prover reação compatível com o solo que será ensaiado, através do uso de sobrecarga ou mediante sua ancoragem no terreno com o auxílio de trados helicoidais.

Não existe norma brasileira para o ensaio de piezocone (CPTu), existindo apenas a NBR 12069 (1991), sobre o ensaio de penetração de cone *in situ* (CPT), que acabou caindo em desuso com a evolução do piezocone. A norma ASTM D5778 (2007) é a referência normalmente usada para padronizar os

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1212881/CA

procedimentos relativos ao ensaio e as características do equipamento a ser empregado.

Mais detalhes sobre o procedimento de ensaio e do equipamento podem ser encontrados em Lunne, Robertson e Powell (1997) e Schnaid e Odebrecht (2012).

4.2.1
Ensaios realizados

Na presente campanha, os ensaios foram feitos pela empresa Geoforma, que usou um pequeno trator de esteiras autopropulsado como equipamento de força e reação para a cravação do cone. O piezocone propriamente dito possuía seção transversal de 10 cm² e tinha o elemento filtrante localizado na base do cone, na posição que se convencionou chamar de u_2. Todas as calibrações necessárias, bem como a saturação do elemento filtrante, foram feitas pela empresa antes da campanha, e os resultados foram recebidos já corrigidos. A velocidade de cravação padrão do ensaio é de 20 mm/s, sendo essa a utilizada na campanha. Em alguns furos do Local 1 foram executadas verticais com velocidades diferentes de cravação, a saber: 2 mm/s, 5 mm/s e 10 mm/s. O objetivo era comparar a influência da velocidade nos resultados, porém, com o avanço do trabalho, decidiu-se não abordar esse aspecto no presente texto.

Como o local em estudo é de um pátio de estacionamento asfaltado, foi necessário ultrapassar o revestimento asfáltico com o uso de um rompedor. Em seguida, foi aberto um pré-furo até que fosse atingido o nível d'água, que se encontrava a cerca de 70 cm de profundidade.

Durante a campanha, haviam sido planejados quatro ensaios de dissipação no Local 1, em diferentes profundidades, de modo a se ter um perfil de coeficientes de adensamento da camada mole já adensada. Entretanto, uma surpresa veio a ocorrer quando da realização do primeiro ensaio de dissipação, na profundidade de 4,30 metros. Havia-se estimado, previamente, que cada ensaio de dissipação duraria em torno de uma hora e meia a duas horas, porém, após esse tempo havia ocorrido apenas 16% da dissipação estimada, valor ainda muito baixo para que se pudesse calcular o coeficiente de adensamento do solo. Decidiu-se

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1212881/CA

aguardar até que a dissipação chegasse aos 50%, porém, passadas sete horas de ensaio conseguiu-se atingir apenas 40% da dissipação estimada. Como o ensaio acabou avançando no período da noite, o trabalho foi encerrado naquele momento, e por esse motivo os outros ensaios de dissipação não chegaram ser realizados.

No total, a campanha contou com 6 verticais de piezocone, sendo 4 no Local 1, 1 no Local 2 e 1 no local 3. Pelas razões explicadas, foram executados apenas 2 ensaios de dissipação, sendo 1 no Local 1 (com duração de 7 horas) e 1 no Local 2. Os resultados são apresentados a seguir.

Ensaios no Local 1

A figura 4.1 mostra a posição e o tipo de cada ensaio executado no Local 1, onde foram concentrados os estudos. As figuras de 4.2 a 4.6 apresentam os resultados de cada um desses ensaios.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1212881/CA

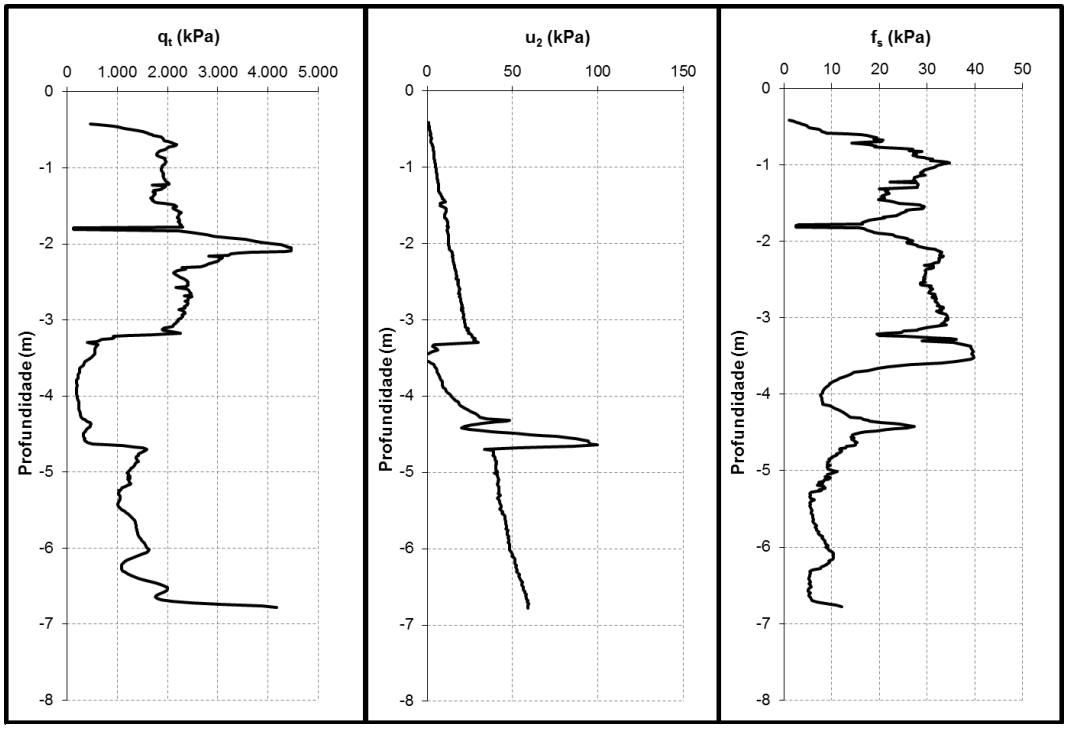


Figura 4.2 – Ensaio de piezocone com velocidade de 2 mm/s

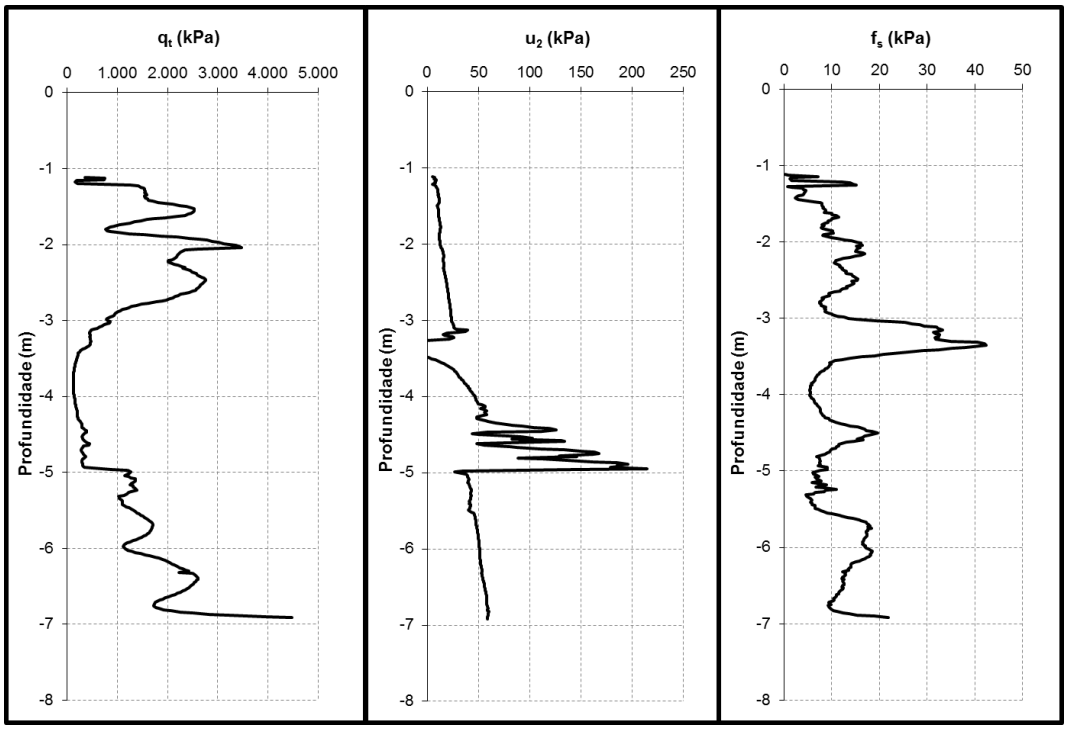


Figura 4.3 – Ensaio de piezocone com velocidade de 5 mm/s

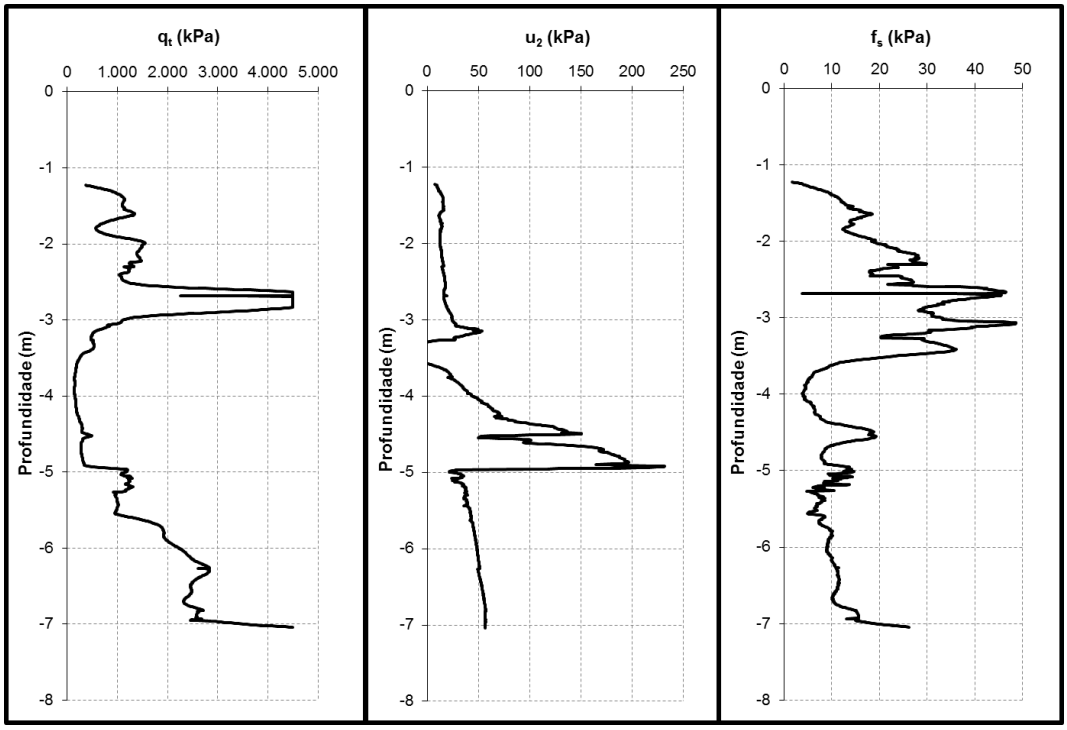


Figura 4.4 – Ensaio de piezocone com velocidade de 10 mm/s

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1212881/CA

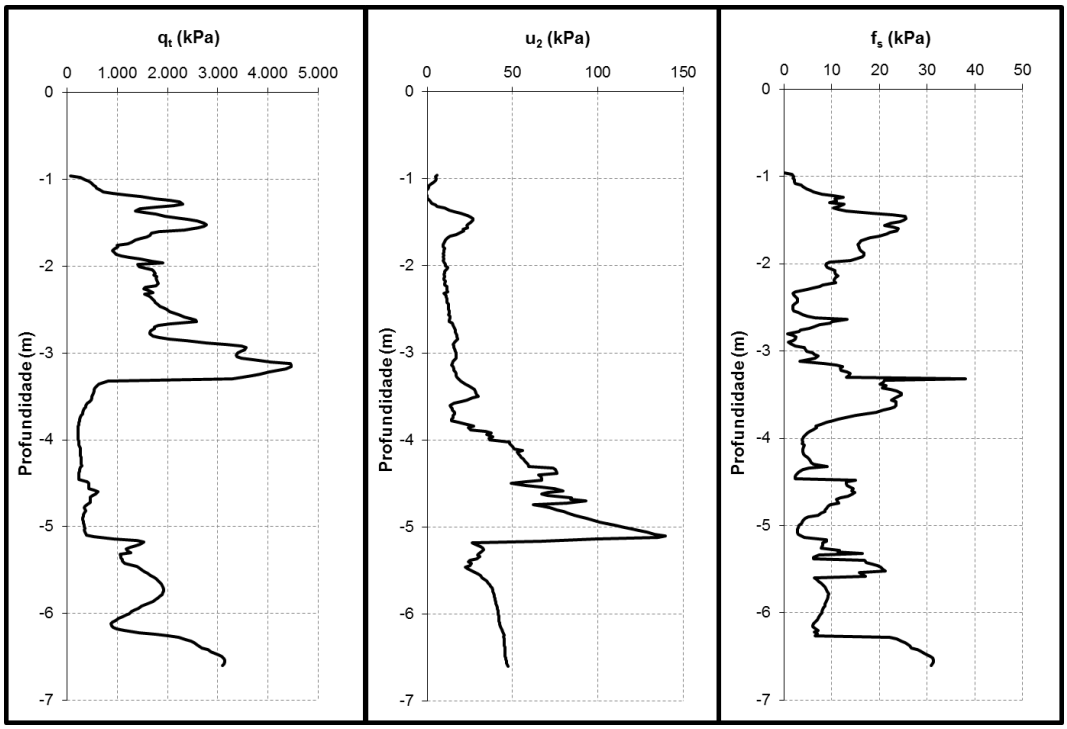


Figura 4.5 – Ensaio de piezocone com velocidade de 20 mm/s

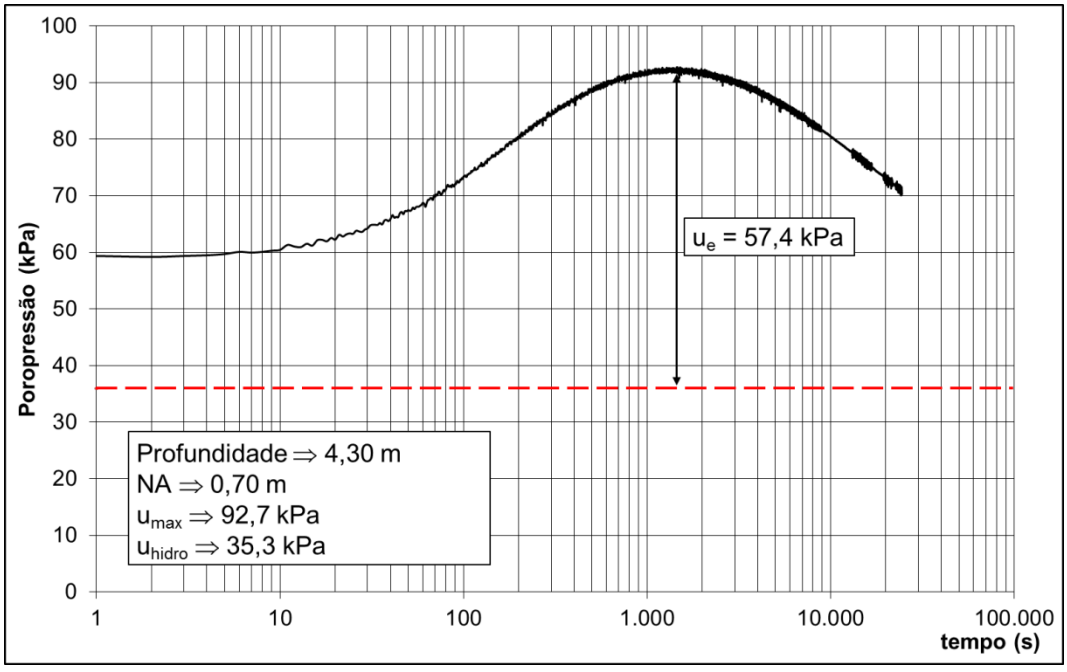


Figura 4.6 – Ensaio de dissipação no Local 1 (poropressão hidrostática indicada)

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1212881/CA

Ensaios no Local 3

A figura 4.8a mostra a posição da vertical de ensaio, e a figura 4.7 apresenta os resultados.

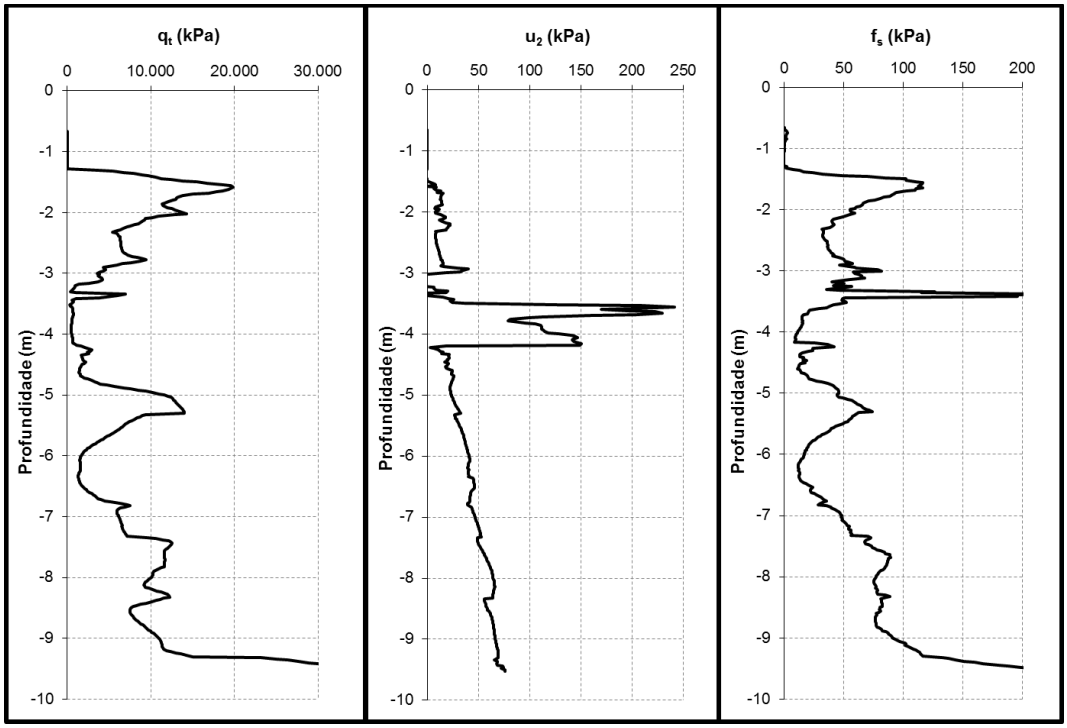


Figura 4.7 – Ensaio de piezocone com velocidade de 20 mm/s

Ensaios no Local 4

A figura 4.8b mostra a posição da vertical de ensaio, e as figuras 4.9 e 4.10 apresentam os resultados.

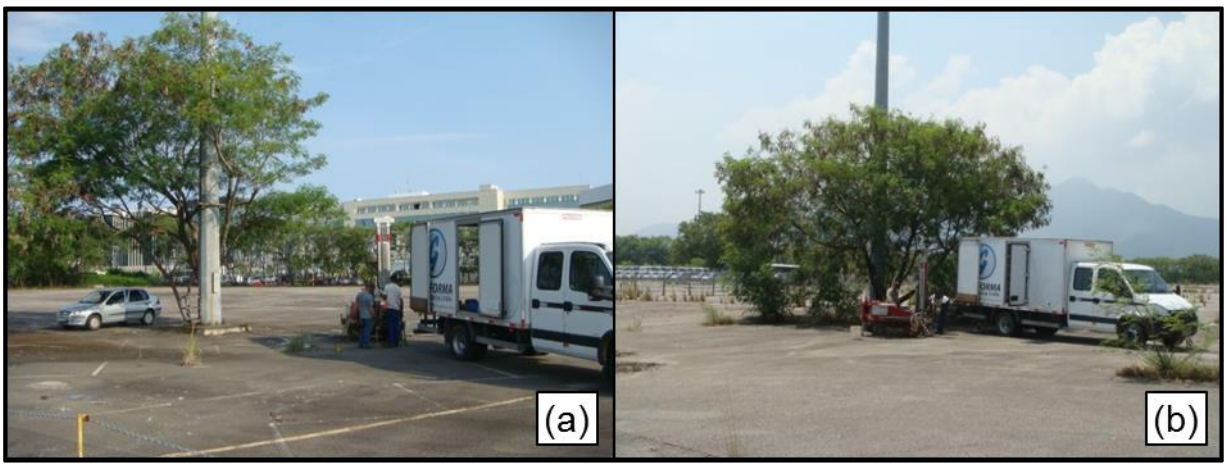


Figura 4.8 – Vista do Local 3 (a) e Local 4 (b)

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1212881/CA

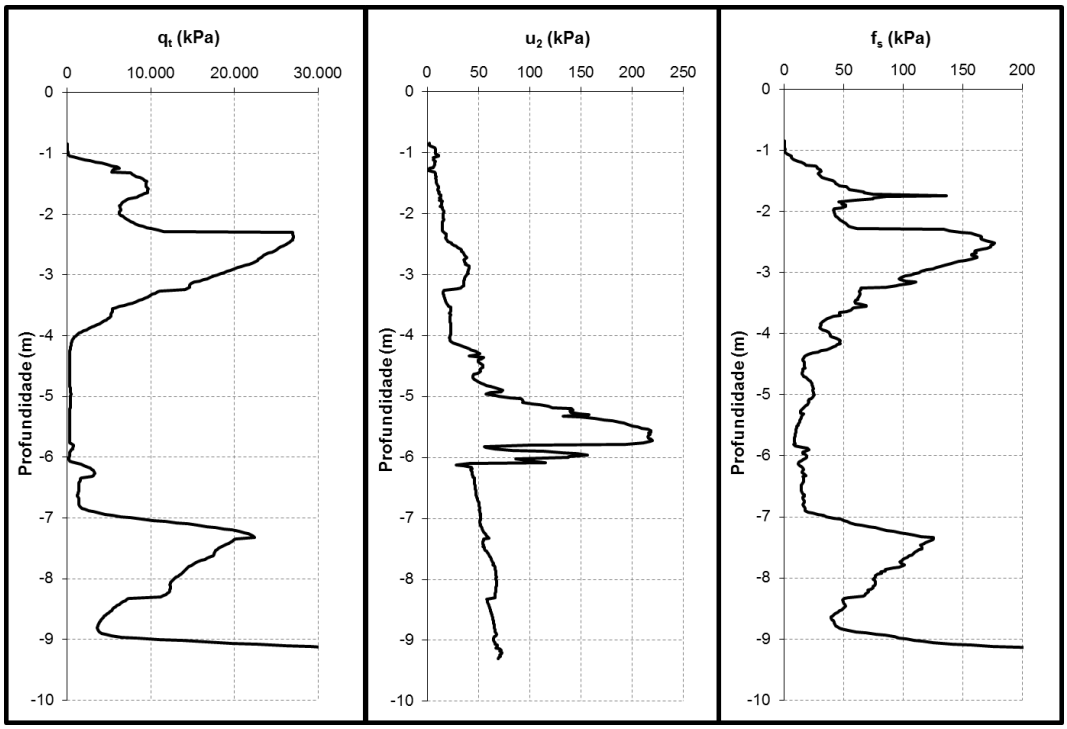


Figura 4.9 – Ensaio de piezocone com velocidade de 20 mm/s

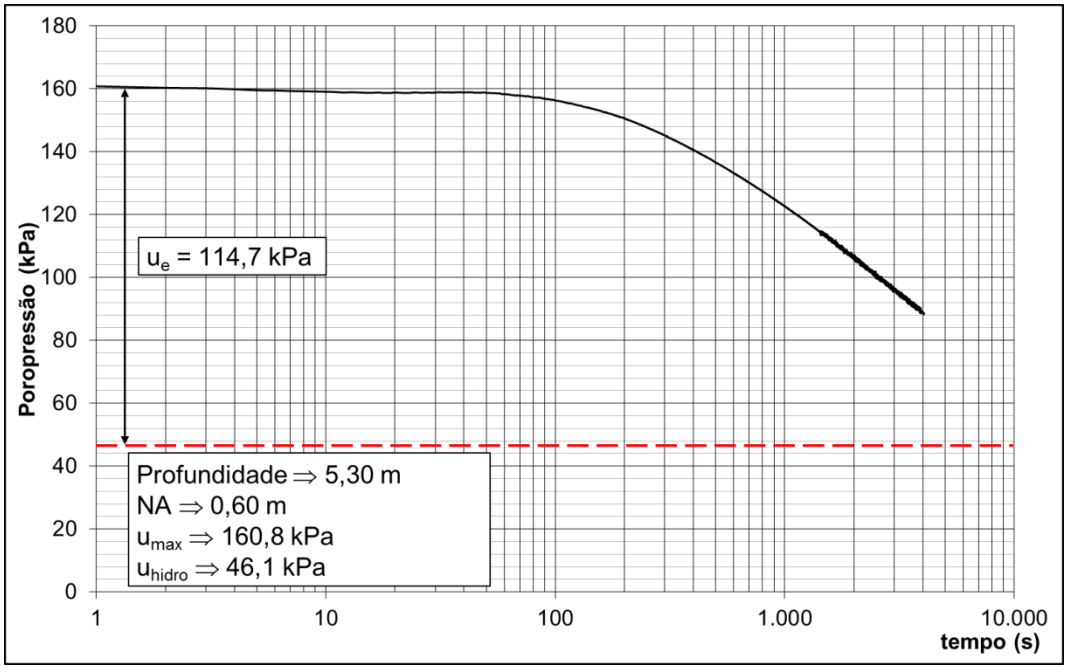


Figura 4.10 – Ensaio de dissipação no Local 4 (poropressão hidrostática indicada)

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1212881/CA

4.2.2
Cálculo do coeficiente de adensamento

A fórmula proposta por Houlsby e Teh (1988) é reescrita a seguir, isolando o coeficiente de adensamento no primeiro membro:

$$c_{hpiezo} = \frac{T^* \cdot R^2 \sqrt{I_R}}{t} \tag{4.1}$$

Para seu uso, serão adotados R = 1,784 cm e I_r = 100. Os valores de "t" serão obtidos das curvas de dissipação apresentadas anteriormente, conforme tenham sido dissipados 40% do excesso de poropressão gerado durante a cravação (u_e) (no caso do Local 1), ou 50% de u_e (no caso do Local 4). Os valores de T* correspondentes são fornecidos pela tabela 2.1, para o transdutor localizado na base do cone (posição u_2). Assim:

Local 1:

$$c_{hpiezo} = \frac{T_{40}^* \cdot R^2 \sqrt{I_R}}{t_{40}} = \frac{0{,}142 \cdot 1{,}784^2 \cdot \sqrt{100}}{25789} \Rightarrow c_{hpiezo} = 1{,}8.10^{-4}\, cm^2/s$$

Local 4:

$$c_{hpiezo} = \frac{T_{50}^* \cdot R^2 \sqrt{I_R}}{t_{50}} = \frac{0{,}245 \cdot 1{,}784^2 \cdot \sqrt{100}}{2376} \Rightarrow c_{hpiezo} = 3{,}3.10^{-3}\, cm^2/s$$

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1212881/CA

4.3
Ensaio de palheta

O ensaio de palheta é o ensaio *in situ* mais empregado para medir a resistência não-drenada ao cisalhamento (S_u) de solos moles (argilas e turfas). Resumidamente, a parte essencial do equipamento consiste de quatro aletas finas e retangulares com seção em formato cruciforme soldadas a um eixo de aço. Esse conjunto é cravado no solo mole e imprime-se ao eixo um movimento de rotação, fazendo as aletas (ou palhetas) cisalharem o solo. O torque é medido e, com a adoção de uma série de hipóteses de natureza física e matemática, pode-se relaciona-lo à resistência não-drenada do solo em questão. O resultado do ensaio

tipicamente é expresso por uma curva do torque em função da rotação correspondente da palheta (em graus).

No Brasil, o ensaio é normatizado pela NBR 10905 (ABNT, 1989). Mais detalhes sobre as características do ensaio e do equipamento podem ser encontradas em Lima (1979) e Schnaid e Odebrecht (2012).

Devido às características do ensaio, para sua realização é necessário o conhecimento prévio da natureza do solo, que pode vir da estratigrafia obtida através de sondagem de simples reconhecimento (com medição de SPT) ou do ensaio CPTu. Schnaid e Odebrecht (2012) ressaltam que, embora o ensaio de palhetas possa ser executado em argilas com resistências de até 200 kPa, a palheta especificada na NBR 10905 apresenta desempenho satisfatório em argilas com resistências inferiores a 50 kPa. Os autores recomendam, ainda, que a usabilidade do ensaio se dá em solos com N_{SPT} menor ou igual a 2 (solos muito moles), correspondendo à resistência de penetração (q_c) menor ou igual a 1.000 kPa.

Na presente campanha, os ensaios de palheta foram realizados pela empresa Geoforma, que empregou palheta com diâmetro de 65 mm e altura de 130 mm e aplicação de torque por unidade elétrica, com velocidade constante de 6º ± 0,6º por minuto, e leituras a cada 0,5º (5 segundos). A medição do torque era feita na superfície, e calibrações realizadas pela própria empresa forneciam o valor do torque aplicado ao solo, corrigido devido ao atrito e à rotação elástica das hastes. Para cada ensaio, a haste com a palheta era mantida dentro da sapata de proteção e o conjunto descia a até 50 cm acima da profundidade de ensaio. Em seguida, somente a palheta era empurrada para fora da sapata e descia até a profundidade especificada, sendo então dado início ao ensaio.

Durante o ensaio, o torque medido era plotado em tempo real em função da rotação da palheta, e esta fase do ensaio era encerrada após o torque ter atingido um valor máximo e começar a diminuir. Eram então impostas dez revoluções ao eixo fazendo com que as palhetas amolgassem completamente o solo ao seu redor. Uma nova fase do ensaio era iniciada com a medição de torque e rotação para, assim, se obter a resistência não drenada do solo amolgado. A relação entre a resistência do solo intacto e amolgado define o parâmetro sensibilidade (S_t). O

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1212881/CA

intervalo de tempo entre o fim da primeira fase e o início da segunda foi inferior a cinco minutos.

No Local 1, foram executados dois ensaios de palheta em uma mesma vertical, nas profundidades 3,90 m e 4,90 m, posições essas tidas como sendo respectivamente da camada de turfa e de argila. Os resultados são apresentados nas figuras 4.11 e 4.12.

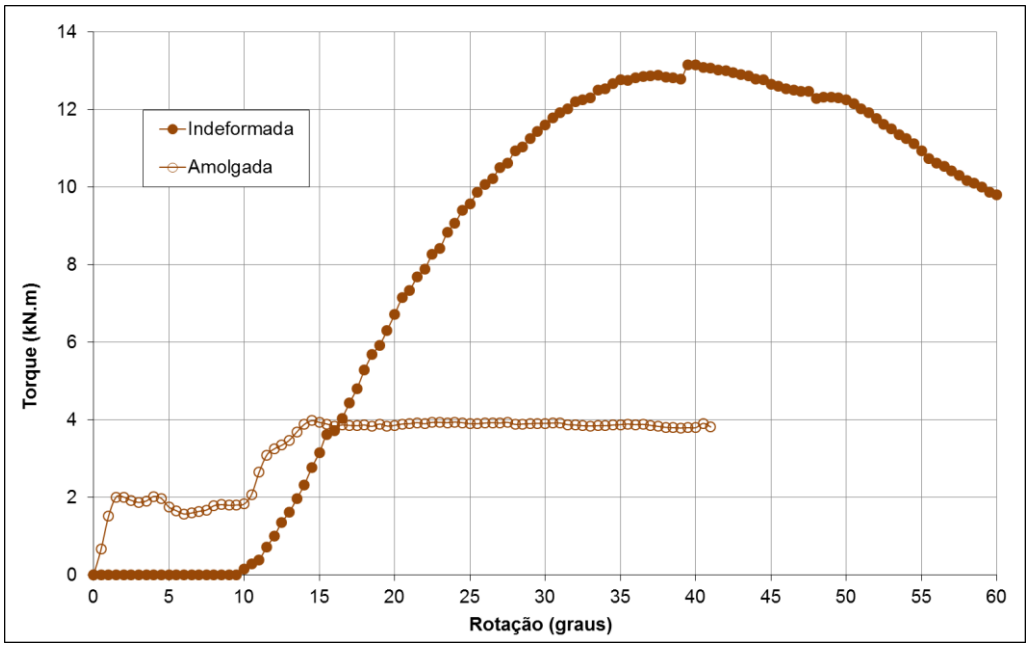


Figura 4.11 – Ensaio de palheta no Local 1, a 3,90 m de profundidade

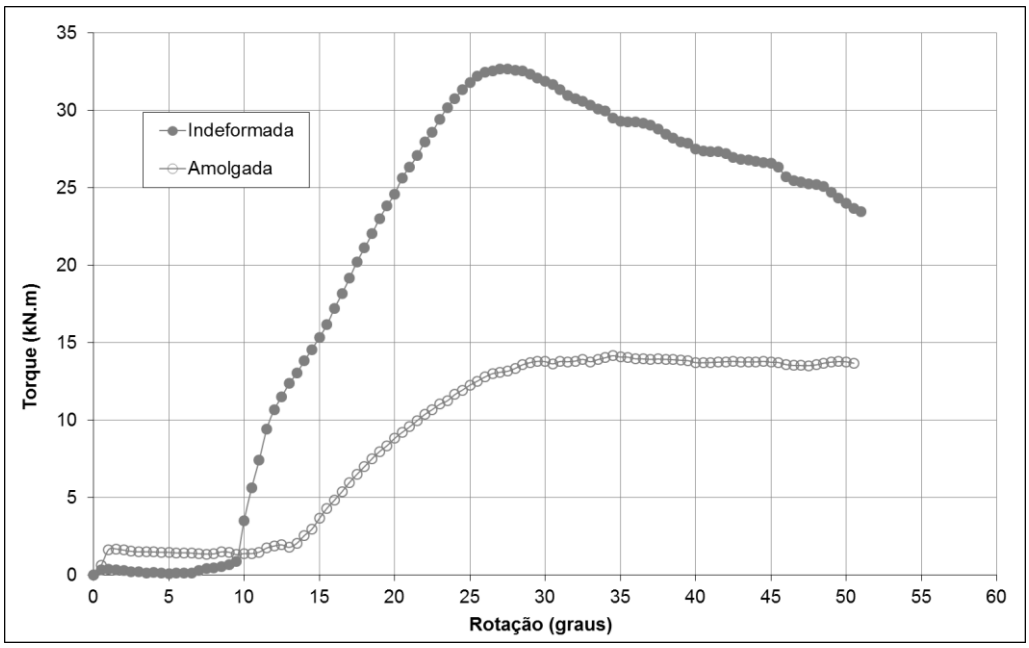


Figura 4.12 – Ensaio de palheta no Local 1, a 4,90 m de profundidade

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1212881/CA

O principal parâmetro fornecido pelo ensaio de palheta é a resistência ao cisalhamento não-drenada (S_u), que é obtida a partir de uma fórmula relativamente simples, relacionando o diâmetro da palheta e o torque máximo aplicado:

$$S_U = \frac{0{,}86.M}{\pi.D^3} \quad \text{, onde} \tag{4.2}$$

Cumpre observar que a equação acima é apenas um caso particular de uma equação geral demonstrada por Lund, Soares e Schnaid (1996), que considera a distribuição não uniforme de tensões nas superfícies horizontais extremas, a anisotropia do solo com relação à resistência não drenada e dimensões da palheta com razão altura/diâmetro diferentes de 2. Mais informações podem ser obtidas em Schnaid e Odebrecht (2012).

A seguir, na tabela 4.1, são apresentados os valores de resistência não drenada para os ensaios realizados. Registra-se também, a título de informação, a sensibilidade dos solos em questão, sendo essa a relação entre a resistência intacta e a resistência amolgada.

Tabela 4.1 – Resistência não drenada e sensibilidade dos solos sondados

Solo	**Intacta**		**Amolgada**		**Sensibilidade**
	M (kN.m)	**S_u (kPa)**	**M (kN.m)**	**S_{ur} (kPa)**	
Turfoso	13,16	13,1	3,98	4,0	3,3
Argiloso	32,69	32,6	14,17	14,1	2,3

4.4
Coleta de amostras indeformadas

Conhecidas as características iniciais e a geometria das camadas de solo mole presentes no terreno, a procurou-se obter amostras dos dois tipos de solo (turfoso e argiloso). Os ensaios de umidade realizados antes do lançamento do aterro mostraram que a metade superior era constituída pela turfa e a metade inferior pela argila, e admitiu-se que essa proporção se manteve após a compressão da camada, que teve sua espessura reduzida dos supostos 4,5 metros

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1212881/CA

iniciais para cerca de 2,0 metros, conforme mostrado pelos ensaios CPTu realizados em 2013.

Com isso, foram perfuradas duas verticais próximas para a coleta de amostras, sendo obtidas duas amostras em cada vertical, uma na camada admitida como turfosa e a outra na camada argilosa. A figura 4.13 mostra um perfil esquemático com as profundidades e distâncias amostradas.

A campanha de amostragem indeformada seguiu as recomendações preconizadas na ABNT NBR 9820 – Coleta de amostras indeformadas de solos de baixa consistência em furos de sondagem, além das orientações contidas em Sandroni (1977), Lima (1979), Ladd e DeGroot (2003) e ASTM D1587 (2008).

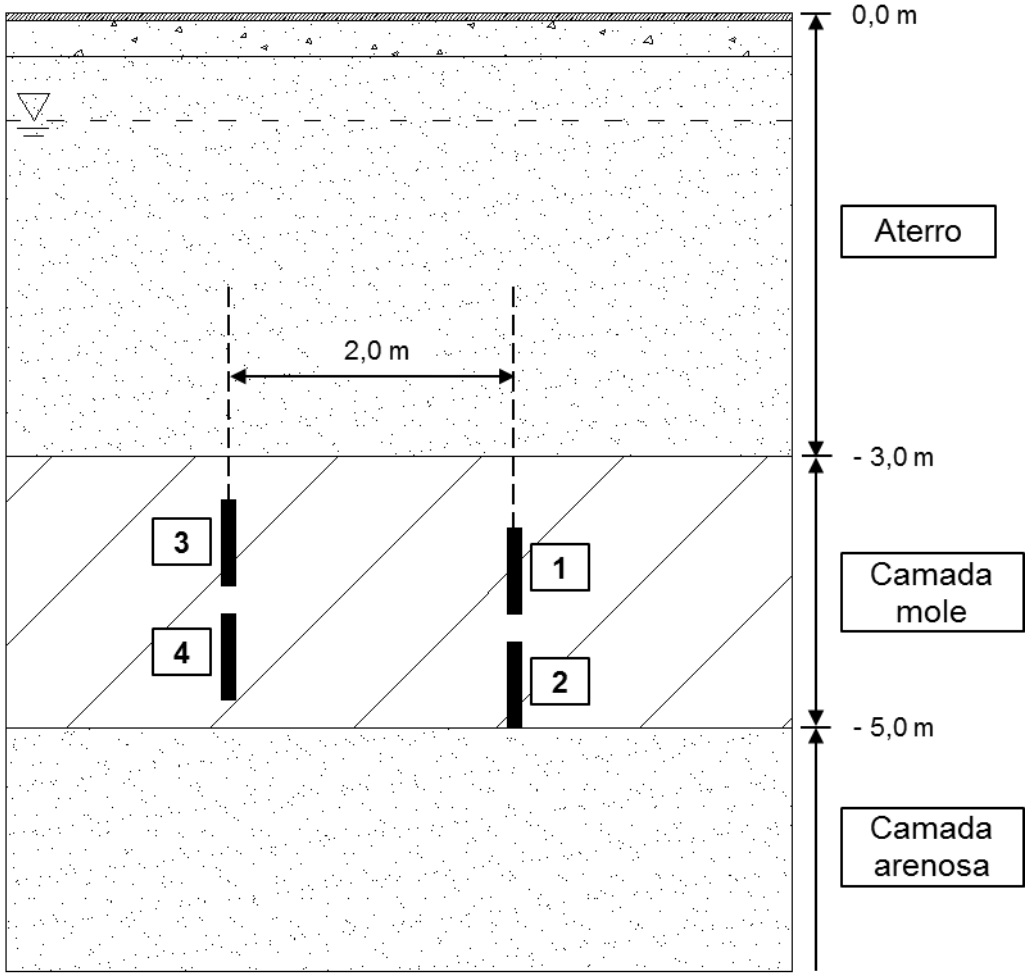


Figura 4.13 – Posição de retirada das amostras indeformadas

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1212881/CA

Tabela 4.2 – Profundidade de coleta das amostras indeformadas

Vertical	Nr Shelby	Profundidade de coleta (m)			Tubo
1	1	3,60	a	4,20	Aço inox
	2	4,40	a	5,00	Aço não inox
2	3	3,40	a	4,00	Aço não inox
	4	4,20	a	4,80	Aço inox

4.4.1
Processo de perfuração

A campanha foi conduzida pela Geoforma, e seguiu, resumidamente, a seguinte sequência:

1) Montagem do tripé com os devidos acessórios para o processo de perfuração;

2) Início da perfuração com auxílio de trado manual;

3) Cravação do tubo de revestimento com saída lateral para material escavado até um pouco abaixo do nível d'água;

4) Preparação da lama bentonítica densa a ser usada na perfuração;

5) Início do avanço da perfuração com trépano de lavagem, sempre mantendo o nível da lama acima da superfície (figura 4.14a);

6) Na cota de amostragem, lavagem do furo até que o fluido de circulação esteja livre de grumos (figura 4.14b);

7) Retirada do trépano e montagem do tubo amostrador com pistão estacionário na extremidade do conjunto de hastes;

8) Descida do conjunto amostrador-pistão até a cota de amostragem com o pistão estacionário travado à frente para impedir a entrada de material no tubo amostrador;

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1212881/CA

9) Cravação estática do tubo;

10) Pausa por 30 minutos para que se desse aderência entre o solo amostrado e as paredes internas do tubo;

11) Após a aderência, rotação do conjunto de hastes para cisalhar a base da amostra;

12) Retirada da composição do furo e desmontagem do amostrador (figura 4.14c);

13) Tão logo o amostrador era separado do pistão estacionário, iniciava-se o processo de lacragem das extremidades do tubo amostrador, utilizando-se parafina fundida e panos embebidos em parafina (figura 4.14d);

14) Quando o amostrador não retornava totalmente preenchido, após a lacragem com parafina o espaço vazio era preenchido com solo arenoso úmido obtido no local, sendo este também coberto com parafina fundida;

15) Terminada a lacragem das duas extremidades, o tubo era acondicionado em uma caixa de madeira específica para o transporte dos tubos Shelby, sendo preenchido com serragem úmida para manter a amostra resfriada e amortecer eventuais impactos (figura 4.14e);

16) Enquanto aguardava os tubos seguintes, a caixa era mantida em posição abrigada do sol;

17) Após a caixa receber os quatro tubos Shelby, a mesma era envolvida em um colchão e acondicionada no banco traseiro de um veículo de passeio, sendo travada e impedida de movimento (figura 4.14f);

18) Ao chegar ao laboratório, as amostras foram imediatamente armazenadas em câmara úmida.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1212881/CA

Figura 4.14 – Fases da coleta de amostras indeformadas

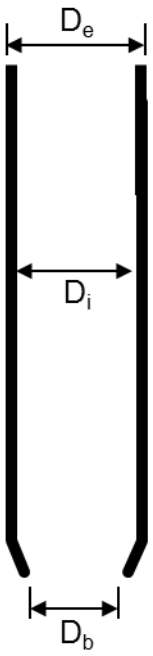
Foi coletada em campo uma amostra da lama bentonítica densa empregada, e essa amostra teve sua massa específica aferida em laboratório, tendo-se obtido o valor de 11,6 kN/m³.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1212881/CA

4.4.2
Tubos amostradores empregados

Foram empregados tubos de parede fina tipo Shelby (10 cm de diâmetro e 60 cm de comprimento), com uso de pistão estacionário durante a cravação para impedir a entrada de material durante a descida do amostrador. Dois dos tubos eram de aço inoxidável e os outros dois de aço não inoxidável.

As dimensões dos tubos foram aferidas antes da campanha, e seus parâmetros (relação de áreas e folga interna) foram calculados fazendo uso das fórmulas abaixo, e os valores obtidos são apresentados na tabela 4.3



$$C_a = \frac{D_e^2 - D_b^2}{D_b^2}$$

$$C_i = \frac{D_i - D_b}{D_b}$$

Figura 4.15 – Parâmetros dos tubos

Tabela 4.3 – Características dos tubos amostradores

Nr tubo	Diâmetro ext. (mm)	Espessura parede (mm)	D/t	C_a	C_i
1	100,23	1,44	70	10,0%	1,9%
2	101,40	1,66	61	14,9%	3,7%
3	101,65	1,64	62	12,7%	2,7%
4	101,44	1,54	66	10,7%	2,0%

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1212881/CA

A NBR 9820 recomenda que o índice de área (C_a) não deve exceder 10% e a relação de folga interna (C_i) deve estar compreendida entre 0,5% e 1,0%. As outras fontes de consulta citadas no início do corrente item recomendam valores da mesma ordem de grandeza para a relação de folga interna. Já para a espessura da parede do tubo (t), Ladd e DeGroot (2003) recomendam que a relação entre o diâmetro externo (D) e a espessura seja maior do que 45, e a ASTM D1587 (2008) recomenda que a espessura de um tubo com 4" de diâmetro seja inferior a 2,4 mm.

Logo, os tubos usados na presente campanha atendem ao critério de espessura, mas ficam com a relação de folga interna acima do recomendado pela literatura consultada.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1212881/CA

4.5
Instalação de poço de monitoramento de nível d'água

A instalação de um poço de monitoramento teve três objetivos: monitorar o nível d'água do terreno, coletar amostra de água para sua caracterização química e obter a água que seria utilizada na inundação das bacias de adensamento dos ensaios oedométricos a serem conduzidos em laboratório. O poço foi perfurado à trado manual (figura 4.16), e a coleta de água se deu com a utilização de uma bomba de baixa vazão, de modo a se evitar a ruptura hidráulica do solo.

A coleta se deu em duas profundidades diferentes, sendo uma no centro da camada de turfa e a outra no centro da camada de argila. Com isso, os ensaios de adensamento foram feitos com a mesma água presente na camada de solo a ser ensaiada.

O monitoramento do nível d'água (NA) passou a ser feito a cada visita para o nivelamento geométrico. Os resultados da variação do NA podem ser vistos na figura 4.17.

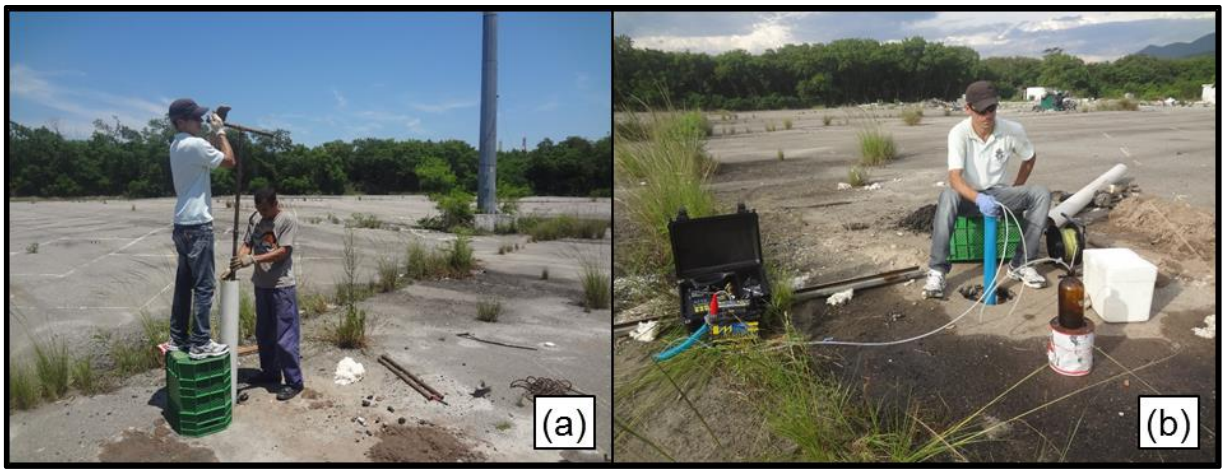


Figura 4.16 – Perfuração de poço e coleta de água para análise química

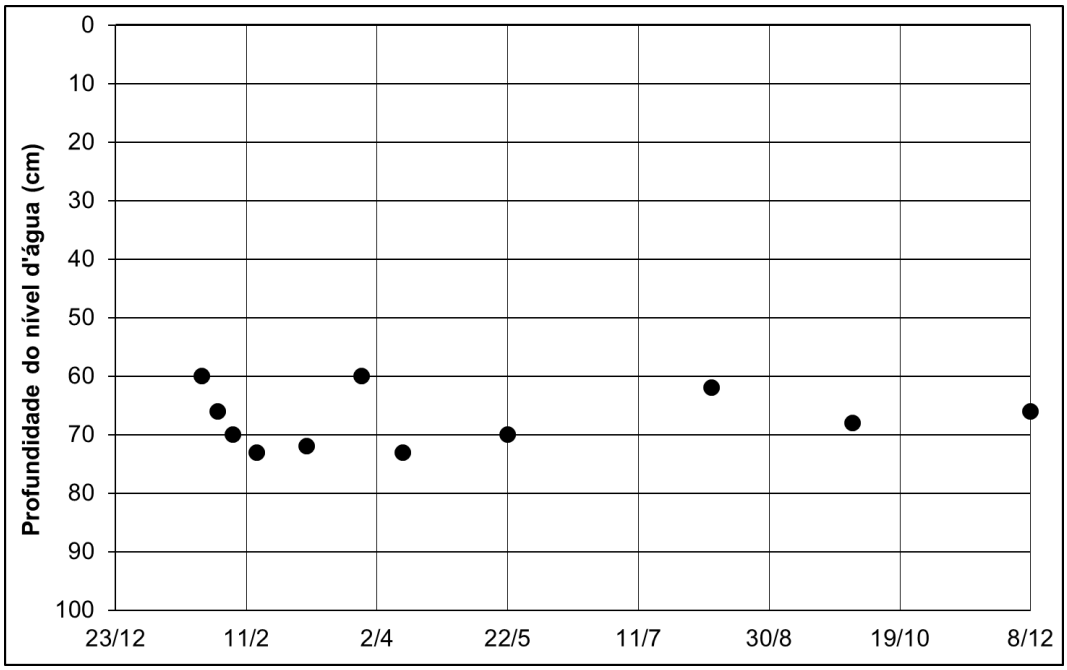


Figura 4.17 – Monitoramento de posição de nível d'água

Com isso, observa-se que o nível d'água no terreno oscilou entre 60 e 73 cm de profundidade nesse período.

Os resultados da caracterização química serão apresentados no capítulo 5.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1212881/CA