

7.

Análise dos resultados

No presente capítulo as informações e parâmetros colhidos na documentação da obra – conforme apresentado no capítulo 3 – são comparadas com os parâmetros obtidos na presente campanha de ensaios de campo (capítulo 4) e laboratório (capítulo 5) e com as medições de recalque oriundas do nivelamento óptico de precisão (capítulo 6). Com isso, pretende-se verificar a correção das previsões feitas inicialmente e analisar esse conjunto de dados buscando obter elementos que permitam concluir sobre qual magnitude de recalque ainda pode ser esperada para o terreno, especulando, também, sobre o tempo necessário para que o fim dos recalques seja atingido.

7.1

Qualidade das amostras indeformadas

O objetivo da amostragem indeformada é a obtenção de material para ensaios em laboratório que permitam a estimativa de parâmetros para projeto, tais como – no caso de solos moles – compressibilidade, tensão de sobreadensamento, coeficiente de adensamento, resistência não drenada dentre outros. Para que se possa ter confiabilidade nos parâmetros obtidos dessa maneira é necessário garantir que as amostras coletadas sejam as mais representativas possíveis do terreno com que se pretende trabalhar, não só no que diz respeito à escolha dos locais a serem amostrados mas também ao procedimento de retirada dessa pequena porção de solo, seu transporte, armazenamento e moldagem em laboratório para ser, finalmente, ensaiada.

Admitindo que os locais de coleta tenham sido escolhidos de maneira representativa, a qualidade dos parâmetros obtidos passa a ser diretamente dependente dos cuidados adotados em cada uma das etapas citadas no final do parágrafo anterior. Um projetista ao receber o resultado de um parâmetro sabidamente incorreto fica incapacitado de saber em qual das etapas houve negligência: em apenas uma ou em todas.

São vários os efeitos do amolgamento em curvas de compressão obtidas a partir de ensaios de adensamento oedométrico de boa e má qualidade, tendo os mais marcantes sido apontados por Martins (1983) e Martins e Lacerda (1994), a saber:

- (a) Qualquer que seja a tensão vertical efetiva, o índice de vazios é menor para as amostras de qualidade inferior;
- (b) O trecho de maior curvatura do gráfico $e \times \sigma'_v$ (log) torna-se menos acentuado dificultando a determinação da tensão de sobreadensamento;
- (c) Redução do valor estimado para σ'_p ;
- (d) Aumento da compressibilidade na região de recompressão;
- (e) Decréscimo da compressibilidade no trecho de compressão virgem;
- (f) Retificação do trecho de compressão virgem (que apresenta-se curvilíneo nas amostras de boa qualidade).

Buscando quantificar o amolgamento sofrido pelo solo a ser ensaiado, Lunne, Berre e Strandvik (1997) propuseram um critério para classificar o corpo de prova segundo o valor de $\Delta e/e_0$, onde Δe é diferença entre o índice de vazios inicial (e_0) e o índice de vazios correspondente à tensão vertical efetiva de campo quando da amostragem ($e_{(\sigma'_{v0})}$). A classificação é apresentada na tabela 7.1.

Tabela 7.1 – Critério de Lunne et al.(1997) para classificação de amostras

OCR	$\Delta e/e_0$			
	Excelente a Muito bom	Bom a Regular	Pobre	Muito pobre
1-2	< 0,04	0,04 - 0,07	0,07 - 0,14	> 0,14
2-4	< 0,03	0,03 - 0,05	0,05 - 0,10	> 0,10

Coutinho (2007) levou em consideração a experiência brasileira e adaptou o critério para as argilas plásticas conhecidas no país, relaxando os valores limite das faixas e tornando o critério mais tolerante para classificar um corpo de prova como de qualidade Muito boa a Excelente e mantendo o mesmo valor limite para classifica-lo como Muito Ruim. A classificação é apresentada na tabela 7.2.

Tabela 7.2 – Critério de Coutinho (2007) para classificação de amostras

OCR	$\Delta e/e_0$			
	Excelente a Muito bom	Bom a Regular	Pobre	Muito pobre
1-2,5	< 0,05	0,05 - 0,08	0,08 - 0,14	> 0,14

Com base nos critérios apresentados anteriormente, os corpos de prova moldados no presente trabalho foram classificados e o resultado pode ser visto na tabela 7.3, a seguir.

Tabela 7.3 – Qualidade dos corpos de prova do presente trabalho

Amostra	CP	$\Delta e / e_0$	Lunne et al (1997)	Coutinho (2007)
TE1	1	0,122	Ruim	Pobre
	2	0,174	Muito Ruim	Muito Pobre
TE2	1	0,057	Boa a Regular	Boa a Regular
	2	0,058	Boa a Regular	Boa a Regular
	3	0,059	Boa a Regular	Boa a Regular
	4	0,070	Boa a Regular	Boa a Regular
TE3	1	0,173	Muito Ruim	Muito Pobre
	2	0,207	Muito Ruim	Muito Pobre
	3	0,248	Muito Ruim	Muito Pobre
TE4	1	0,068	Boa a Regular	Boa a Regular
	2	0,063	Boa a Regular	Boa a Regular
	3	0,070	Boa a Regular	Boa a Regular
	4*	0,239	Muito Ruim	Muito Pobre

Obs: o CP 4* foi amolgado intencionalmente a título de comparação

De acordo com ambos os critérios, nenhum corpo de prova (CP) pode ser classificado na faixa superior de qualidade, sendo que praticamente todos os CP moldados em solo turfoso apresentaram qualidade insatisfatória (à exceção de um) e todos os CP moldados no solo argiloso apresentaram qualidade Boa a Regular (à exceção daquele amolgado intencionalmente).

O autor acompanhou todas as fases da amostragem, desde a coleta em campo e o transporte (conforme item 4.4) até a moldagem dos corpos de prova em laboratório (conforme descrito no item 5.3). A coleta foi procedida por empresa especializada nesse tipo de serviço e se revestiu de todos os cuidados preconizados na NBR 9820. O transporte foi feito em automóvel particular, com as amostras acondicionadas dentro de caixas de madeira construídas especificamente para este fim e preenchidas com serragem molhada. Esta caixa foi protegida por um colchonete e transportada na vertical e em baixa velocidade por todo o trajeto. A moldagem em laboratório foi descrita no item 5.3 e dispensa maiores comentários acerca do zelo com que foi feita. Ainda assim, as amostras em solo turfoso foram classificadas na faixa inferior de qualidade em ambos os critérios adotados. Cabem algumas reflexões sobre o porquê dessa situação.

A única variável que fugiu ao disposto na NBR 9820 foi a especificação dos tubos amostradores tipo Shelby empregados, que conforme apresentado no item 4.4.2 possuíam relação de folga interna (C_i) acima do valor máximo recomendado. A consequência disso é que, durante o processo de cravação, a amostra sofre uma expansão na direção radial ao penetrar no tubo, distorcendo-se. Essa é uma das causas do amolgamento.

Entretanto, esse motivo ainda não esclarece o fato de as qualidades dos CP moldados em solo turfoso terem sido tão inferiores às dos CP moldados em solo argiloso. Para isso, recorre-se ao fato observado durante a moldagem dos CP descrita em detalhes no item 5.3.4.3 e ilustrado na figura 5.7, onde se observa uma curiosa expansão axial acompanhada de contração diametral. Mais uma vez o CP sofre distorção e amolga-se, sendo a combinação deste fator com o citado no parágrafo anterior as mais prováveis causas da baixa qualidade observada para os CP moldados em solo turfoso.

Considerando que os CP moldados em solo argiloso apresentaram a relação $\Delta e/e_0$ com valores próximos ao limite que classifica amostras como de qualidade Excelente a Muito Boa (pelo critério de Coutinho, 2007), o autor conclui que a expansão axial observada durante o processo de moldagem dos CP turfosos foi o principal fato causador da baixa qualidade observada.

A compreensão desse comportamento pode ser avaliada observando-se as curvas de compressão do solo turfoso, apresentadas nas figuras 5.13 e 5.14 (amostra 1) e figuras 5,19 a 5,21 (amostra 3). Nelas pode-se notar que o trecho de expansão possui uma parcela de recuperação elástica maior do que a que seria esperada intuitivamente para um solo mole. Comparando a relação entre o índice de expansão (C_e) e o índice de compressão (C_c) dos ensaios em solo turfoso com a mesma relação para os ensaios em solo argiloso, percebe-se que o valor é cerca de 4 vezes maior (tabela 5.3). Esse fato corrobora a situação observada quando da abertura do tubo Shelby, expondo o solo que ali se encontrava confinado desde a amostragem em campo, quando o mesmo estava confinado pelo carregamento imposto pelo aterro e pelo solo subjacente. Esse efeito será tão mais pronunciado quanto maior for a profundidade amostrada e quanto maior for o carregamento atuante, caso exista.

Embora esse efeito da descompressão durante a moldagem não tenha sido descrito, curvas de compressão semelhantes foram apresentadas em ensaios realizados em terrenos próximos ao local ora em estudo, como em Martins (2000) em ensaios realizados a cerca de 500 metros de distância à profundidade de 2,00 a 2,70, e em Baroni (2010), em ensaios realizados a cerca de 400 metros de distância à profundidade de 2,20 m a 2,30 m. As figuras 7.1 e 7.2 apresentam as curvas citadas.

Isso indica que a amostragem nesse tipo de solo fica comprometida, ainda que sejam empregados tubos amostradores com relação de folga interna dentro da faixa especificada pelas normas. A dificuldade a ser superada é evitar que a expansão axial observada ocorra (amolgando a amostra), o que parece ser bastante complicado de executar já isso acontece em poucos minutos e o processo de moldagem exige cuidado e paciência, não podendo ser feito às pressas.

Estudar o porquê da ocorrência dessa expansão nesse tipo de solo e desenvolver um modo eficiente de moldar os corpos de prova é assunto de grande importância, mas foge ao escopo do presente trabalho.

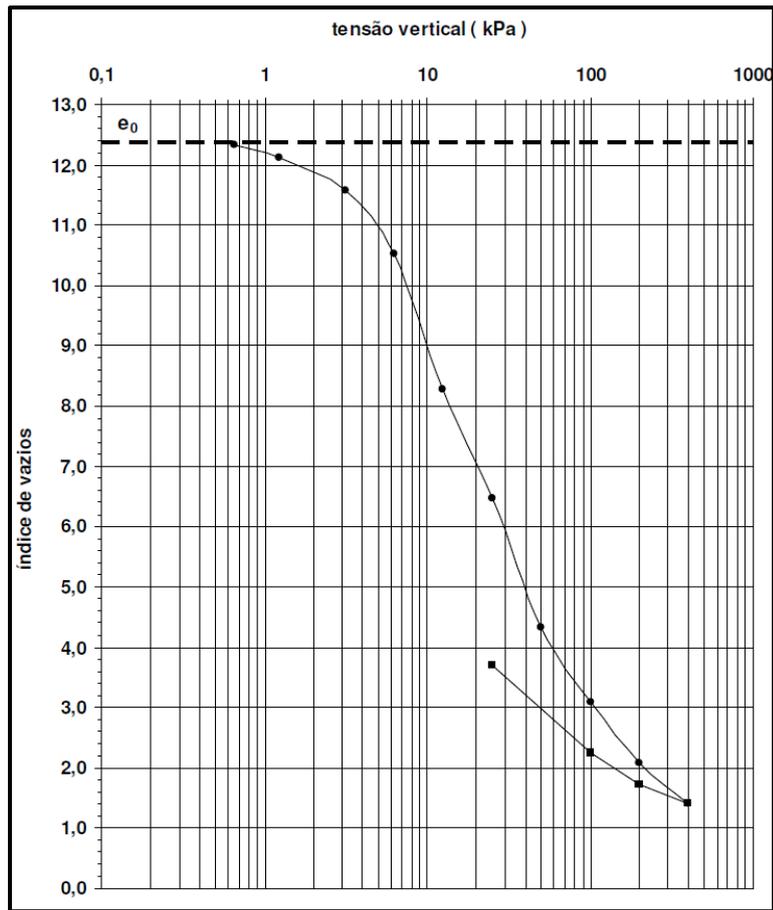


Figura 7.1 – Curva de compressão obtida em Baroni (2013)

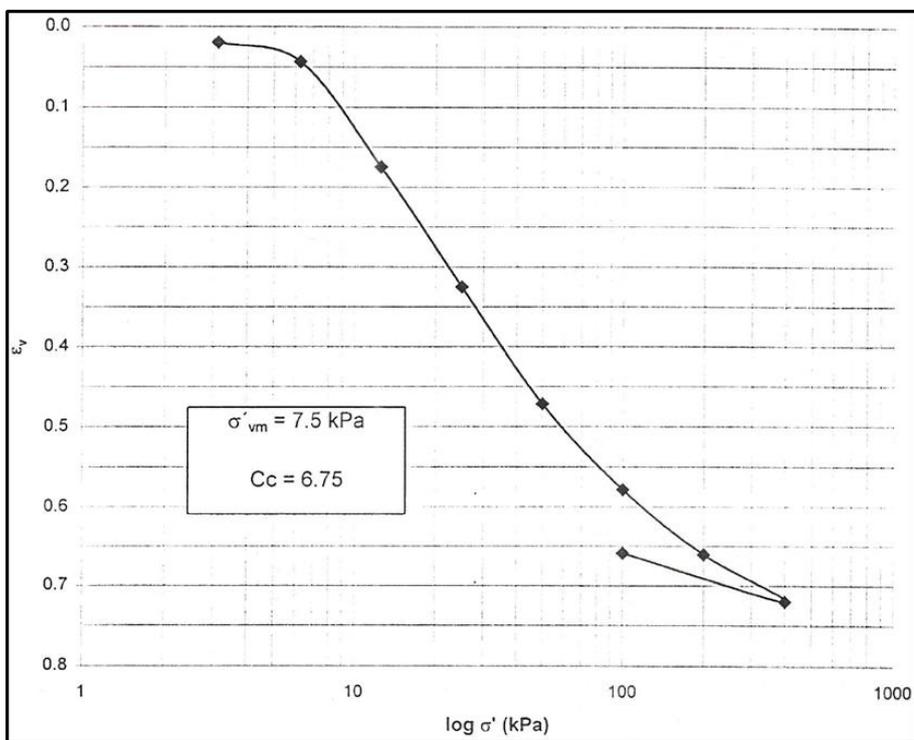


Figura 7.2 – Curva de compressão obtida em Martins (2000)

7.2

Obtenção de parâmetros do solo virgem

Para que os objetivos do capítulo sejam atingidos, faz-se necessária a adoção de um modelo geotécnico para o terreno virgem, ou seja, antes do carregamento ser lançado, 18 anos atrás. Para isso serão utilizadas tanto as informações disponíveis na documentação da obra quanto informações de ensaios próximos realizados em terrenos virgens. Os parâmetros importantes para análise de recalques que se pretende obter são os seguintes:

- Peso específico saturado do solo
- Índice de vazios inicial
- Razão de compressão e razão de recompressão
- Tensão de sobreadensamento
- Coeficiente de adensamento

7.2.1

A partir dos ensaios da obra

Conforme apresentado nos capítulos 3 e 5, o solo mole presente no terreno é constituído por duas camadas com características bastante distintas: a superior, turfosa, de coloração marrom escura e a inferior, argilosa, de coloração cinza escura. No Local 1, onde se concentraram os ensaios, a camada turfosa ia originalmente desde a superfície até a profundidade aproximada de 2,5 metros, iniciando ali a camada argilosa que se aprofundava até os 4,0 a 4,5 metros. A figura 3.3 apresenta um perfil esquemático do terreno, confeccionado durante a fase de projeto da obra a partir das sondagens.

No capítulo 3 foi apresentada a tabela 3.3 que contém parâmetros obtidos nos ensaios de laboratório realizados quando da fase de estudos para a implantação da obra. Na ocasião foram coletadas amostras indeformadas com tubos Shelby de 3 polegadas de diâmetro em três pontos do terreno denominados

ES-01, ES-02 e ES-03, cujas posições são indicadas na figura 3.2 e os dados aqui resumidos na tabela 7.1.

Tabela 7.4 – Resumo dos parâmetros obtidos em laboratório no solo virgem de Terra Encantada

Furo	Prof. (m)	Umidade (%)	G_s	γ_{nat} (kN/m ³)	e_0	σ'_p (kN/m ²)	$C_c / 1 + e_0$
ES-01	1,40	587	1,93	10,7	11,3	7,4	0,48
	2,90	199	2,22	12,5	4,4	6,6	0,49
	5,90	209	2,22	12,7	4,6	12,0	0,54
ES-02	1,75	541	1,93	10,6	10,4	3,7	0,47
	2,90	544	1,93	10,5	10,5	4,9	0,43
	5,90	205	2,22	12,1	4,5	12,1	0,51
ES-03	1,40	503	1,93	10,5	9,7	8,0	0,65
	2,90	561	1,93	10,7	10,8	6,2	0,49
	5,90	195	2,22	12,4	4,3	16,2	0,58

Para os parâmetros peso específico saturado, índice de vazios inicial e compressibilidade virgem, serão usadas fórmulas específicas ou correlações empíricas regionais, que se baseiam no teor de umidade natural (ω) e na massa específica dos grãos (G_s).

Para a massa específica dos grãos, ao invés dos valores apresentados na tabela 3.3 serão usados os valores obtidos nos ensaios feitos durante o presente trabalho (apresentados na tabela 5.1), já que essa grandeza se mantém inalterada mesmo após o carregamento ocorrido, que está longe de ser suficiente para induzir quebra nos grãos sólidos e assumindo que não tenha ocorrido alteração química nos mesmos que viessem e modificar seu valor. A tabela 7.5 resume os valores obtidos.

Tabela 7.5 – Valores de G_s adotados

Amostra	Tipo de solo	G_s	G_s (médio)
TE 1	Turfoso	2,084	2,029
TE 3		1,974	
TE 2	Argiloso	2,577	2,534
TE 4		2,491	

Já o valor do teor de umidade será retirado do gráfico apresentado na figura 3.10, restringindo a massa de pontos àqueles mais próximos do Local 1, conforme a figura 7.3. A figura 7.4 exibe essas umidades.

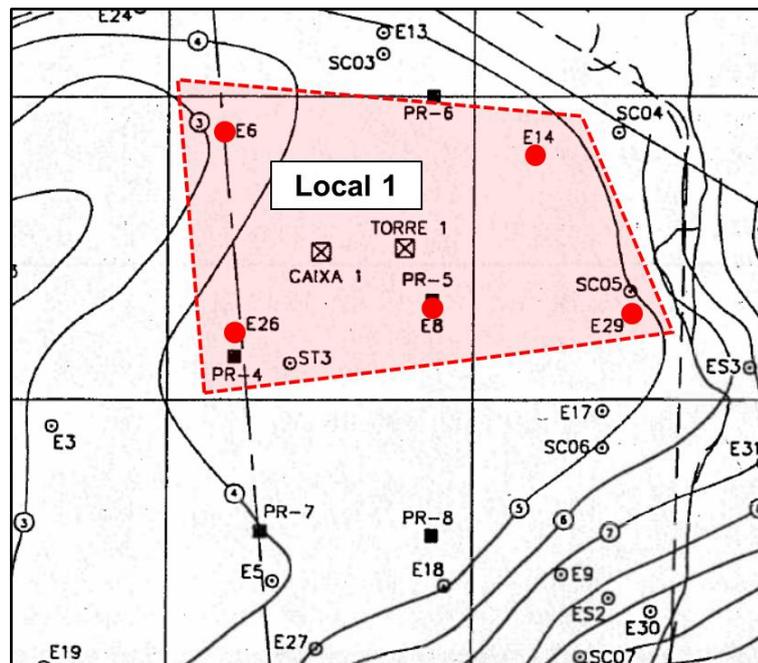


Figura 7.3 – Posição de ensaios de umidade realizados próximo ao local em estudo

O ensaio para determinação do teor de umidade é bastante simples e pouco sujeito a erros. A maior fonte de erro ocorre devido à perda de umidade durante o manejo inadequado das amostras quando de sua retirada do interior do amostrador Terzaghi-Raymond usado nas sondagens com medição de SPT. O que valida os ensaios de umidade apresentados acima é o fato de as umidades determinadas no solo das amostras Shelby – essas sim dotadas de maior confiabilidade pois o solo

no interior do tubo não é exposto ao ar senão no momento de sua abertura já dentro do laboratório –, se encaixarem na faixa de valores mostrada.

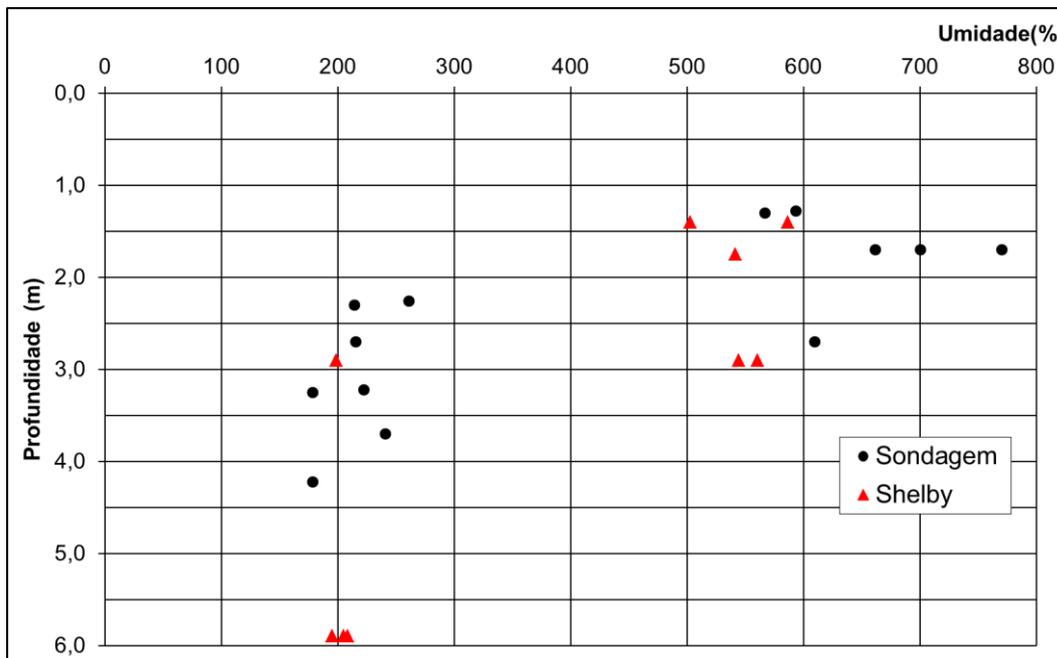


Figura 7.4 – Teores de umidade natural do solo virgem, próximos ao local em estudo

Pela figura acima podem ser identificadas duas camadas de solo com teores de umidade bastante diferentes, uma superior, com umidades variando entre 180 e 250 %, correspondente à camada turfosa, e outra inferior, com umidades variando entre 570 e 770 %, correspondente à camada argilosa.

De posse do teor de umidade natural e da massa específica dos grãos, os três primeiros parâmetros buscados podem ser calculados.

Peso específico saturado do solo (γ_{sat})

De acordo com a documentação da obra (Geoprojetos, 1997), sabe-se que o nível d'água antes do lançamento do aterro se encontrava na superfície do terreno. Com isso, pode-se assumir, com razoável grau de certeza, que a saturação do solo era de 100%. Nesta situação, existe uma fórmula facilmente demonstrável que permite obter γ_{sat} a partir dos valores de ω e G_s , a saber:

$$\gamma_{sat} = G_s \cdot \gamma_w \cdot \frac{1 + \omega}{1 + \omega \cdot G_s} \quad (7.1)$$

Assim, é possível montar a tabela 7.6, mostrando que os valores limite para o peso específico saturado do solo de cada camada são compatíveis com os apresentados na tabela 7.4.

Tabela 7.6 – Pesos específicos saturados a serem adotados

Camada	Profundidade (m)	Tipo de solo	Teor de umidade (%)			γ_{sat} (kN/m ³)		
			570%	a	770%	10,8	a	10,6
Superior	0,0 a 2,0	Turfoso	570%	a	770%	10,8	a	10,6
Inferior	2,0 a 4,0	Argiloso	180%	a	250%	12,8	a	12,1

Índice de vazios inicial

Assumindo, novamente, que a saturação do solo era de 100%, o índice de vazios inicial (e_0) do solo virgem pode ser prontamente calculado pela fórmula:

$$e = \left[\frac{G_s \cdot \gamma_w}{\gamma_{sat}} (1 + \omega) \right] - 1 \quad (7.2)$$

Com isso é possível montar a tabela 7.7, que mostra os valores limite para o índice de vazios inicial (e_0) do solo de cada camada.

Tabela 7.7 – Índices de vazios iniciais a serem adotados

Camada	Profundidade (m)	Tipo de solo	Teor de umidade (%)			e_0		
			570%	a	770%	11,7	a	15,5
Superior	0,0 a 2,0	Turfoso	570%	a	770%	11,7	a	15,5
Inferior	2,0 a 4,0	Argiloso	180%	a	250%	4,7	a	6,1

Razão de compressão e razão de recompressão

Um valor de razão de compressão ($CR = C_c / (1 + e_0)$) foi apresentado na tabela 7.4, relativo aos ensaios feitos nas amostras indeformadas já citadas. Outra

maneira foi apresentada no capítulo 2, através de correlações com a umidade natural do solo apresentadas por Sandroni (2006) e Silva (2013). Seguem novamente as equações lá apresentadas.

Sandroni (2006):

$$CR = \frac{C_c}{1 + e_0} = 0,28 + \frac{\omega}{14,3} \quad , \text{ para } 100\% < \omega < 400\% \quad (2.9)$$

$$CR = \frac{C_c}{1 + e_0} = 0,56 \quad , \text{ para } \omega > 400\% \quad \text{onde,} \quad (2.10)$$

Silva (2013):

$$C_c = 0,0115 \cdot \omega + 0,800 \quad (2.11)$$

Como as correlações anteriores fornecem parâmetros distintos (CR e C_c), para que se possa compara-las, a correlação proposta por Silva foi dividida pelos valores máximos e mínimos de índice de vazios ($1+e_0$) apresentados na tabela 7.7, de modo a também fornecer o valores limite de CR.

Com isso, pode-se montar a tabela 7.8 comparativa entre os valores obtidos através das diferentes correlações e dos valores oriundos dos ensaios de laboratório em amostras indeformadas.

Tabela 7.8 – Comparação entre CR obtidos por diferentes correlações

Tipo de solo	Teor de umidade (%)		CR (por Sandroni, 2006)			CR (por Silva, 2013)			
		a		a			a		
Turfoso	570%	a	770%	0,56	a	0,56	0,45	a	0,76
Argiloso	180%	a	250%	0,41	a	0,45	0,40	a	0,64

Observa-se que para as umidades mais altas de cada camada de solo, a correlação proposta por Silva (2013) fornece valores bastante altos quando comparados com os resultados obtidos de ensaios de laboratório, ao passo que as correlações propostas por Sandroni apresentam valores bem mais baixos.

Para a umidade mais baixa da camada turfosa, Silva fornece um valor próximo ao do ensaio de laboratório enquanto Sandroni fornece um valor bem mais alto. Já para a camada argilosa, ambas as correlações provêm valores iguais e inferiores ao obtido nos ensaios de laboratório.

Considerando que não são conhecidas as minúcias das condições em que foram executados os ensaios de laboratório, para os cálculos a serem realizados no presente capítulo será considerada a faixa de valores obtida a partir da média dos valores fornecidos pelas correlações. Merece destaque o fato de que os ensaios de laboratório e esse valor médio a ser usado possuem ordem de grandeza semelhante, conforme exposto na tabela 7.9.

Tabela 7.9 – Faixas de CR obtidos por diferentes métodos

Tipo de solo	CR (ensaio de adensamento)			CR (média das correlações)		
Turfoso	0,43	a	0,65	0,50	a	0,66
Argiloso	0,49	a	0,58	0,40	a	0,55

Conforme proposto por Sandroni (2006), para solos costeiros da região do Rio de Janeiro a razão de recompressão ($SR = C_r/1+e_0$) pode ser tomada como $SR = CR/8$.

Tensão de sobreadensamento

Conforme já apresentado na tabela 7.4, esse parâmetro foi obtido através de ensaios de adensamento realizados na fase de projeto da obra.

No capítulo 2 foram apresentadas outras correlações que permitem a estimativa da tensão de sobreadensamento a partir de ensaios de palheta.

$$\text{Mesri (1975): } S_{u\text{ palheta}} = \frac{0,22}{\mu} \cdot \sigma'_p \quad (2.12)$$

$$\text{Mayne e Mitchell (1988): } OCR = \alpha \cdot \left(\frac{S_u}{\sigma'_{vo}} \right) \text{ e } \alpha = 22 \cdot (IP)^{-0,48} \quad (2.13)$$

Com isso, pode-se montar a tabela 7.10 com os valores da tensão de sobreadensamento fornecidos a partir de cada uma das correlações acima. O gráfico da figura 7.5 compara esses valores com os obtidos nos ensaios de adensamento, apresentados na tabela 7.4.

O gráfico mostra que ambas as correlações se adequam muito bem aos valores obtidos nos ensaios de adensamento oedométrico em laboratório. É digno de nota o fato de a feição da distribuição dos valores obtidos com ambas as correlações ser a mesma, com o detalhe de que a correlação de Mesri prescinde do conhecimento do índice de plasticidade.

Tabela 7.10 – Tensão de sobreadensamento obtida por correlações com ensaios de palheta

Dados iniciais			Mesri (1975)		Mayne e Mitchell (1988)			
Prof. (m)	$S_{u\ med}$ (kPa)	σ'_{vo} (kPa)	σ'_p (kPa)	OCR	IP	α	OCR	σ'_p (kPa)
1,0	2,9	0,9	8,0	8,9	350	1,32	4,3	3,9
1,5	2,1	1,4	5,6	4,2	350	1,32	2,0	2,7
2,0	4,7	1,8	12,8	7,1	350	1,32	3,5	6,2
2,5	4,4	3,1	12,0	3,9	350	1,32	1,9	5,8
3,0	2,9	4,4	8,0	1,8	120	2,21	1,5	6,5
3,5	2,7	5,7	7,2	1,3	120	2,21	1,0	5,9
4,0	4,7	7,0	12,8	1,8	120	2,21	1,5	10,4
4,5	3,2	8,5	8,8	1,0	120	2,21	0,8	7,1
5,0	6,4	10,0	17,4	1,7	120	2,21	1,4	14,1
5,5	5,5	11,5	15,1	1,3	120	2,21	1,1	12,2
6,0	11,1	13,0	30,2	2,3	120	2,21	1,9	24,5
6,5	8,1	14,5	22,2	1,5	120	2,21	1,2	18,0
7,0	26,8	16,0	73,0	4,6	120	2,21	3,7	59,1
7,5	22,2	17,5	60,4	3,5	120	2,21	2,8	49,0
8,0	12,8	19,0	35,0	1,8	120	2,21	1,5	28,4
8,5	18,6	20,5	50,8	2,5	120	2,21	2,0	41,2
9,0	21,6	22,0	58,8	2,7	120	2,21	2,2	47,7
9,5	25,7	23,5	70,0	3,0	120	2,21	2,4	56,8
10,0	17,4	25,0	47,6	1,9	120	2,21	1,5	38,5

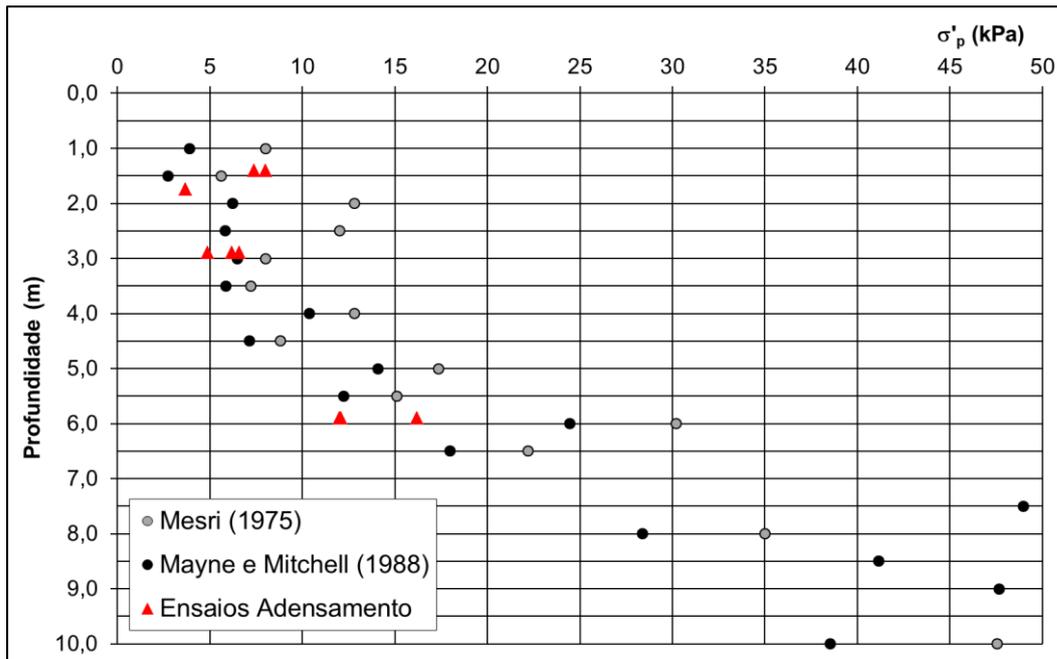


Figura 7.5– Tensão de sobreadensamento obtida por correlações com ensaios de palheta

Coeficiente de adensamento

Também no capítulo 3 foi apresentada a figura 3.10, que exibe um gráfico com os valores de coeficiente de adensamento obtidos nos mesmos ensaios de adensamento oedométrico, que foram:

(a) $c_v = 1$ a 6×10^{-4} cm²/s, para a parte turfosa mais perto da superfície com umidades na faixa de 500% a 600%, independentemente do nível de tensões;

(b) $c_v = 2$ a 13×10^{-4} cm²/s (recompressão) e $c_v = 0,1$ a 4×10^{-4} cm²/s (compressão virgem), para a parte argilosa mais profunda, com umidade na faixa de 200% a 270%,

7.2.2

A partir de comparação com ensaios em terrenos próximos

Conforme exposto no capítulo 3, buscou-se validar a ordem de grandeza dos parâmetros a serem usados nas estimativas ao longo do presente capítulo com

base em ensaios oriundos de estudos em terrenos próximos. A seguir esses parâmetros são analisados.

7.2.2.1

Ensaio de laboratório

Para que pudesse ser feita a comparação entre os ensaios desejados, procurou-se identificar nas pesquisas citadas a camada a que cada ensaio pertencia. Nas três pesquisas a camada de solo mais superficial, que se estendia até cerca de dois metros de profundidade, possuía umidades altas, da ordem de 500-600 %, guardando semelhança com o material turfoso identificado em Terra Encantada. Logo abaixo dessa camada se iniciava outra, argilosa, com umidades na faixa 150-250%, que se estendia em alguns casos até abaixo de dez metros de profundidade.

De posse das informações apresentadas no capítulo 3 (e replicadas na tabela 7.4), pode-se situar os valores dos parâmetros obtidos nos ensaios realizados em Terra Encantada previamente ao lançamento do aterro, conforme mostrado na tabela 7.11, deixando claro que a ordem de grandeza dos valores encontrados está consoante com a realidade da microrregião investigada.

7.2.2.2

Ensaio de campo

São conhecidas as dificuldades em amostragens de boa qualidade em solos muito moles como os da região em estudo. Além disso, existe imprecisão também no cálculo de σ'_{vo} devido à incerteza associada à determinação da posição do nível d'água, prejudicada ainda mais pelos baixos valores de peso específico envolvidos (da ordem de 11 kN/m³).

Como explicado no item 7.1, o amolgamento da amostra acarreta a subestimativa do valor da tensão de sobreadensamento e do coeficiente de adensamento. Por esse motivo, ensaios de campo suprem – embora também com

algumas deficiências –, as imprecisões advindas dos parâmetros obtidos em laboratório.

Os resultados dos ensaios a serem analisados a seguir foram apresentados no capítulo 3.

Tensão de sobreadensamento

No capítulo 2 foram apresentadas correlações para estimar a tensão de sobreadensamento a partir dos ensaios de piezocone é através dos parâmetros K_1 ou K_2 . As correlações são:

$$\sigma'_p = K_1 \cdot (q_t - \sigma_{vo}) \quad (2.14)$$

$$\sigma'_p = K_2 \cdot (q_t - u_2) \quad (2.15)$$

Baroni (2010) comparou ensaios de piezocone com ensaios de adensamento oedométrico e calibrou o valor desses parâmetros para seu local de estudo. Os valores obtidos foram:

$$K_1 = 0,150 ; K_2 = 0,265$$

Esses valores são os mesmos obtidos por Januzzi (2009) para o depósito de argila mole do Sarapuú II, Rio de Janeiro.

Empregando esses valores para os ensaios a serem aqui considerados obtêm-se os resultados mostrados nas figuras 7.6 a 7.8.

Tanto as correlações apresentadas por Baroni (que expressam OCR ao invés de σ'_p) quanto as correlações feitas com os ensaios realizados pela COPPE podem ser comparadas com os valores de σ'_p (ou OCR) obtidos em laboratório. Para ambos os casos observa-se uma boa concordância entre os parâmetros de laboratório e os fornecidos pelas correlações, situando o valor de σ'_p abaixo de 10 kPa para a profundidade de interesse (entre 0 e 5 metros). Mesmo os valores obtidos a partir dos ensaios executados pela Geofirma – que não dispõem de ensaios de adensamento para comparação – mantêm a ordem de grandeza de σ'_p dentro da mesma faixa de valores.

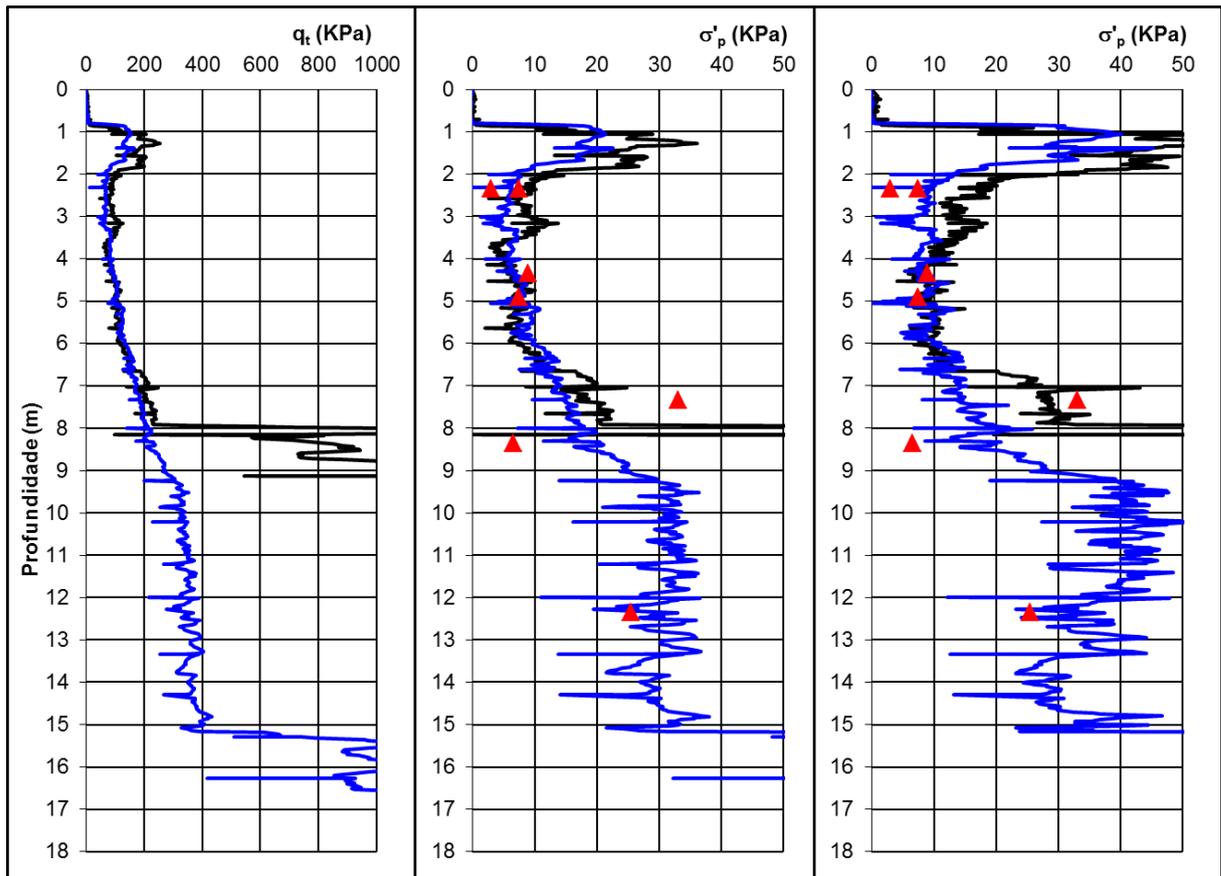


Figura 7.6 – Tensão de sobreadensamento obtida por correlações com ensaios de piezocone (Rótula, 2000)

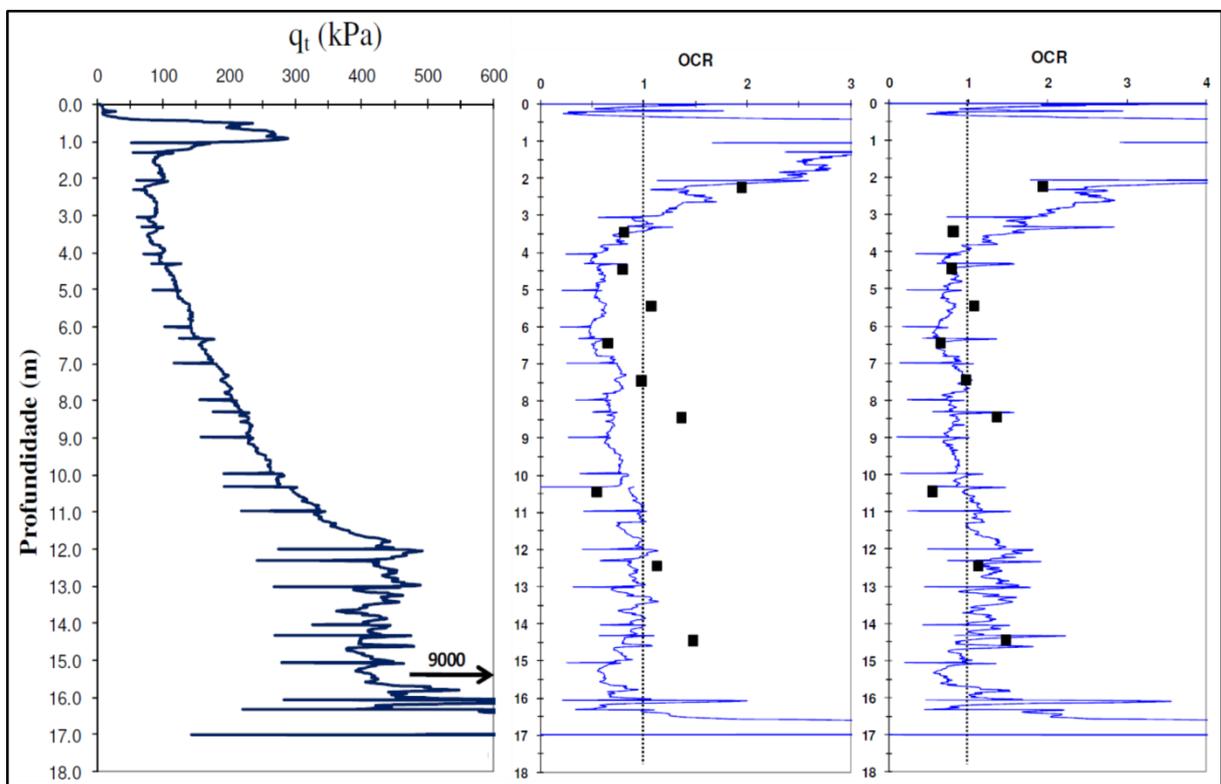


Figura 7.7 – Razão de sobreadensamento obtida por correlações com ensaios de piezocone (Baroni, 2000)

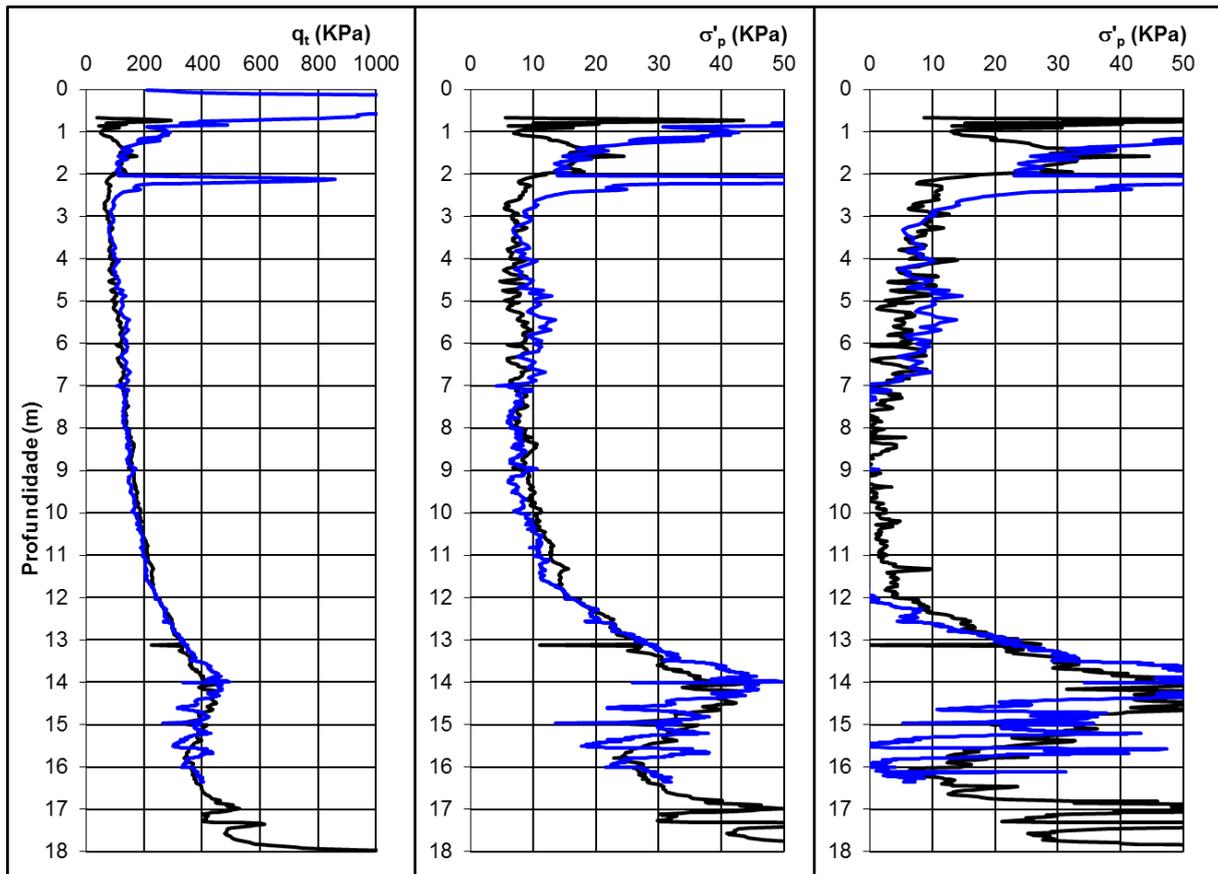


Figura 7.8 – Tensão de sobreadensamento obtida por correlações com ensaios de piezocone (Transcarioca, 2013)

Fazendo uso, ainda, dos ensaios de palheta apresentados por Baroni (2010), é possível empregar a correlação já apresentada de Mayne e Mitchell (1988) para se estimar a tensão de sobreadensamento, como pode ser visto na tabela 7.9. Os valores lá mostrados indicam que σ'_p oscila entre 7 e 13 kPa na profundidade até 6,0 metros.

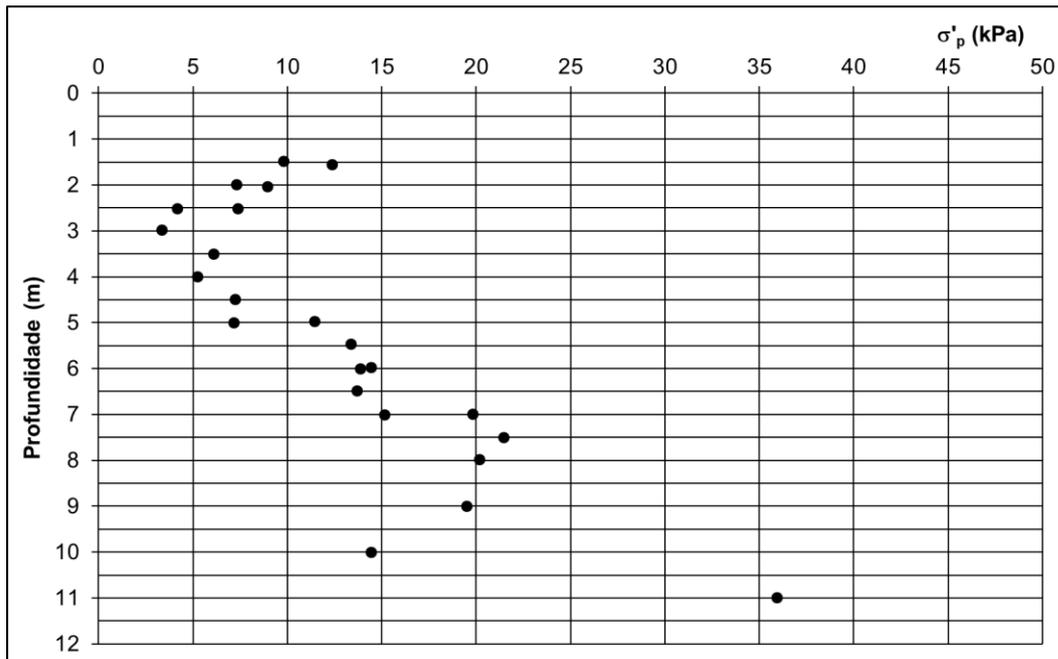


Figura 7.9 – Tensão de sobreadensamento obtida por correlações com ensaios de palheta (Baroni, 2010)

Coeficiente de adensamento

São apresentados a seguir os coeficientes de adensamento obtidos nos trabalhos já elencados (figura 7.10):

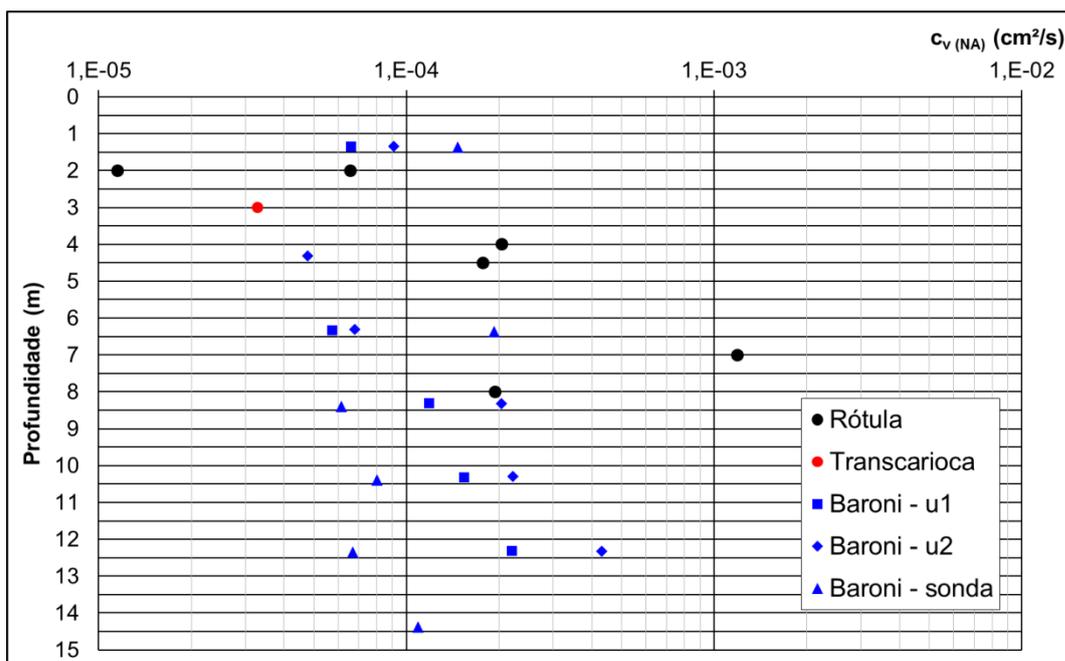


Figura 7.10 – Coeficientes de adensamento obtidos em campo com ensaios de dissipação (diversos autores)

7.2.3

Modelo geotécnico do solo virgem

A partir das informações apresentadas ao longo do presente item pode-se recompor um modelo geotécnico do solo que represente suas condições anteriores ao lançamento do aterro. As faixas de valores obtidos estão resumidas na tabela 7.11.

Tabela 7.11 – Comparação entre parâmetros obtidos em Terra Encantada e em terrenos próximos

Camada	Terra Encantada						Terrenos vizinhos					
	Turfosa			Argilosa			Turfosa			Argilosa		
Prof. (m)	superficial com $w > 450\%$			inferior com $w < 250\%$			superficial com $w > 450\%$			inferior com $w < 250\%$		
γ_{nat} (kN/m ³)	10,6	a	10,8	12,1	a	12,8	10,0	a	10,7	11,1	a	12,4
e_0	11,7	a	15,5	4,7	a	6,1	11,8	a	13,2	4,8	a	7,2
CR	0,45	a	0,65	0,40	a	0,60	0,41	a	0,56	0,35	a	0,51
σ'_p (kN/m ²)	2,7	a	10,1	2,7	a	10,1	3,0	a	10,0	3,0	a	10,0
c_{vmed} (NA) (cm ² /s)	1,0E-04	a	6,0E-04	1,0E-05	a	4,0E-04	1,8E-06	a	7,0E-06	5,1E-05	a	7,3E-03

Confrontando os parâmetros obtidos na campanha de ensaios realizada no próprio terreno em estudo com os parâmetros oriundos de campanhas realizadas em terrenos vizinhos, que se assume serem constituídos de solos com características bastante semelhantes, a faixa de valores a serem adotados deste ponto em diante está mostrada na tabela 7.12 a seguir:

De posse de parâmetros como e_0 , σ'_p e CR, as curvas de compressão de cada camada de solo podem ser reconstituídas (figura 7.11), levando em conta as faixas de valores apresentadas acima. Isso permitirá facilidade nos cálculos de recalque que serão feitos adiante.

Tabela 7.12 – Valores de parâmetros a serem adotados

Camada	Turfosa			Argilosa		
	Prof. (m)					
Prof. (m)	0,0	a	2,0	2,0	a	4,0
γ_{nat} (kN/m ³)	10,3	a	10,7	11,6	a	12,6
e_0	11,7	a	14,4	4,7	a	6,7
CR	0,43	a	0,61	0,38	a	0,56
σ'_p (kN/m ²)	3	a	10	3	a	10

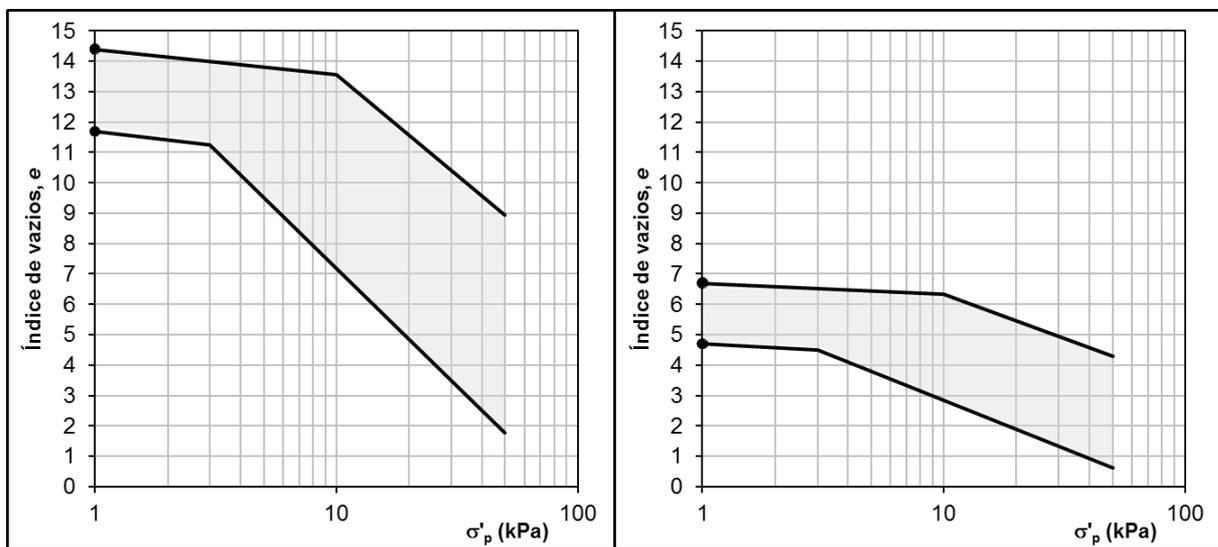


Figura 7.11 – Reconstituição das curvas de compressão das duas camadas de solo a partir dos parâmetros obtidos para os solões virgens – Turfa (esquerda) e Argila (direita)

Para o coeficiente de adensamento, serão considerados os valores apresentados na tabela 7.13.

Tabela 7.13– Comparação entre valores de c_v obtidos em campo e em laboratório

c_v laboratório (cm^2/s)				
Camada	Min	Max	Médio	Médio (camada)
Turfosa	3,45E-06	9,50E-06	5,63E-06	1,31E-04
Argilosa	6,79E-05	7,85E-04	2,56E-04	

c_v campo (cm^2/s)			
Camada	Min	Max	Médio (camada)
Turfosa	4,80E-05	4,30E-04	1,40E-04
Argilosa			

7.3

Obtenção de parâmetros do solo após carregamento

7.3.1

A partir dos ensaios de laboratório

Os parâmetros de laboratório de interesse foram todos calculados no capítulo 5 e são a seguir resumidos na tabela 7.14.

Tabela 7.14 – Parâmetros do solo após o carregamento

Amostra	Prof. (m)	Tipo de solo	γ_{nat} (kN/m^3)	e_0	σ'_p (kN/m^2)	CR	$c_v(\text{SA})$ (cm^2/s)
TE 3	3,40 a 4,00	Turfoso	11,26	5,62	22,3	0,48	1,34E-05
TE 1	3,60 a 4,20		10,94	5,28	32,7	0,52	4,45E-05
TE 4	4,20 a 4,80	Argiloso	13,57	3,06	55,9	0,45	2,33E-04
TE 2	4,40 a 5,00		13,74	3,17	58,2	0,42	3,09E-04

O coeficiente de adensamento exibido acima é relativo à tensão vertical efetiva corrente, que para a camada mole de 3,0 e 5,0 metros de profundidade varia entre 34 e 40 kPa, tensão que corresponde ao trecho sobreadensado do solo.

7.3.2

A partir dos ensaios de campo

Neste subitem serão calculados os parâmetros do solo a partir dos ensaios de campo descritos no capítulo 4, que contemplaram 6 verticais de piezocone nos três locais em estudo (Local 1, 3 e 4), 2 ensaios de dissipação (Local 1 e 4) e 2 ensaio de palhetas (Local 1).

7.3.2.1

Tensão de sobreadensamento

A partir de ensaios de piezocone

Para a correlação entre resistência de ponta do piezocone ($q_t - \sigma_{vo}$) e tensão de sobreadensamento (σ'_p), será adotando o parâmetro $K_1 = 0,15$, já que conforme explicado no item 7.2.2.2 esse valor forneceu boa concordância entre os resultados de campo e laboratório.

A figura 7.12 apresenta a variação de σ'_p com a profundidade obtida a partir da correlação acima e, para comparação, os valores de σ'_p obtidos nos ensaios de adensamento mostrados no capítulo 5.

Pela figura, observa-se que ambas as correlações (por K_1 e por K_2) identificam duas regiões de valores mais baixos, nas profundidades de 3,80 e 4,70 aproximadamente, posições próximas às estimadas como sendo os centros das camadas turfosa e argilosa, respectivamente. A ordem de grandeza dos valores obtidos em laboratório e os estimados a partir dos ensaios de piezocone é a mesma. A tabela 7.15 mostra os resultados.

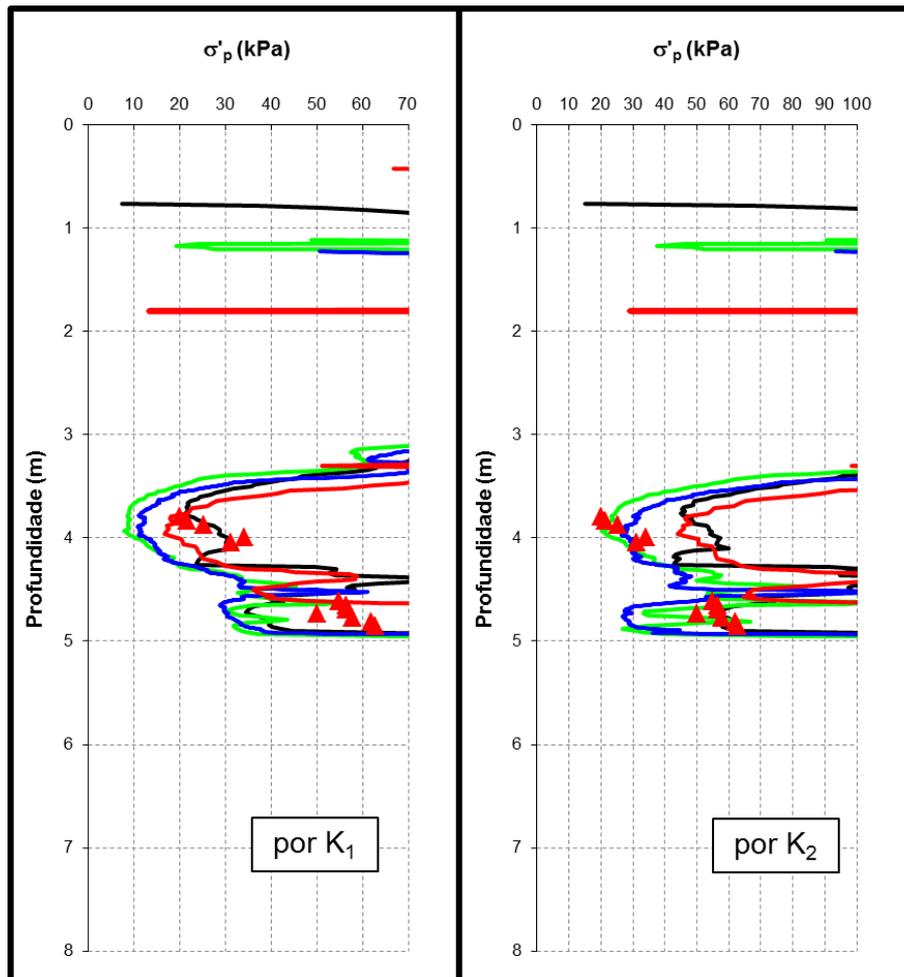


Figura 7.12 – Tensão de sobreadensamento obtida por correlações com ensaios de piezocone

Tabela 7.15 – Valores de tensão de sobreadensamento por correlação

Camada	por K_1			por K_2		
	Min	Max	Média	Min	Max	Média
Turfosa	8	22	15	22	45	34
Argilosa	29	37	33	27	66	47

A partir de ensaios de palheta

Empregando as correlações de Mesri (1975) e de Mayne e Mitchell (1988), mostradas no item 7.2.1, os valores de resistência não drenada (S_u) apresentados no capítulo 4 podem ser usados para a estimativa da tensão de sobreadensamento, conforme figura 7.13. Faz-se a ressalva de que a equação proposta por Mesri apresenta a constante 0,22 no 2º membro, porém esse valor só pode ser aplicado

para solos não jovens. Após o carregamento o solo não pode mais ser considerado dessa maneira (pois passa a ser “jovem” novamente), motivo pelo qual o valor da constante deve passar a ser de 0,26 (Mesri, 1975).

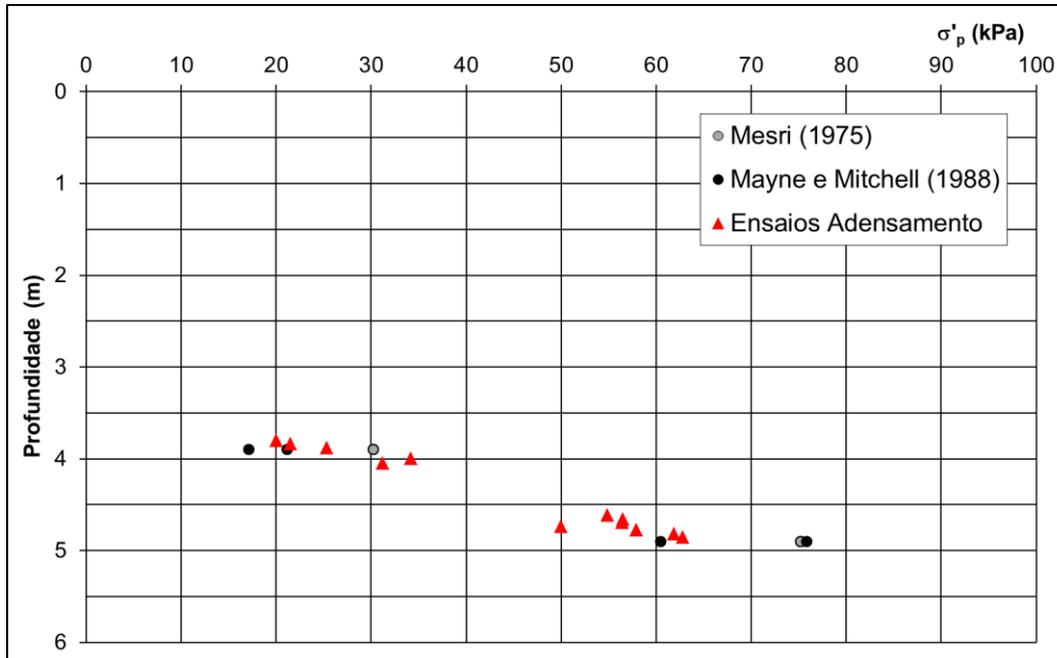


Figura 7.13 – Tensão de sobreadensamento obtida por correlações com ensaios de palheta

Como a correlação de Mayne e Mitchell (1988) depende do valor do Índice de Plasticidade (IP) e os valores obtidos para esse parâmetro tiveram grande dispersão, o cálculo da tensão de sobreadensamento foi feito levando em conta os valores máximos e mínimos de IP. Novamente é digno de nota o fato de a correlação de Mesri (1975) estar dentro da faixa dos valores obtidos, à despeito de seu cálculo ser independente do IP. Pode-se observar que houve boa concordância entre σ'_p obtido por correlações com os ensaios de palheta e os obtidos pelos ensaios de laboratório para as duas camadas de solo existentes. A tabela 7.16 mostra os resultados.

Tabela 7.16 – Valores de tensão de sobreadensamento (em kPa)

Camada	Mesri (1975)	Mayne e Mitchell (1988)		
		Mín	Max	Média
Turfosa	30	17	21	19
Argilosa	75	61	76	68

7.3.2.2

Coeficiente de adensamento

No capítulo 4 foram calculados os coeficientes de adensamento horizontal ($c_{h \text{ piezo}}$) a partir dos dois ensaios de dissipação realizados no terreno em estudo, um no Local 1 – à profundidade de 4,30 metros – e outro no Local 4 – a 5,30 metros de profundidade.

Com isso, multiplicando os valores obtidos pelas relações mostradas no capítulo 2 (item 2.3.2.3) pode-se montar o gráfico da figura 7.14.

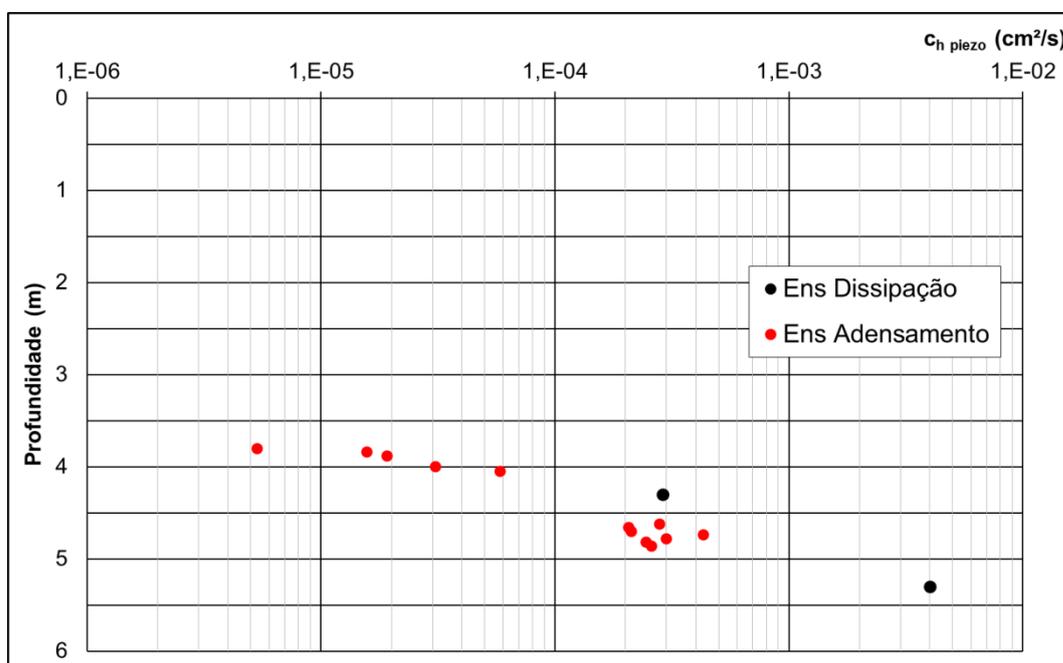


Figura 7.14 – C_v por ensaios de dissipação de piezocone e por ensaios de adensamento

Cumprе salientar que não foi feito ensaio de dissipação na camada inferior (argilosa) no Local 1, que é onde foram executados todos os ensaios de laboratório. Entretanto, como no Local 4 a profundidade de 5,30 metros está mais próxima da camada resistente inferior do que da superior, por analogia assume-se que o ensaio tenha sido realizado no solo argiloso.

7.3.3

Modelo geotécnico do solo após carregamento

De posse dos parâmetros oriundos da campanha de ensaios de campo e laboratório executados no presente trabalho, pode-se construir um modelo geotécnico do solo que represente suas condições 18 anos após o lançamento do aterro. A tabela 7.17 resume a faixa de valores a ser adotada a partir deste ponto.

Tabela 7.17 – Parâmetros adotados para o solo após carregamento

Camada	Turfosa			Argilosa		
Prof. (m)	3,0	a	4,0	4,0	a	5,0
γ_{nat} (kN/m ³)	11,1			13,7		
e_0	5,3	a	5,6	3,1	a	3,2
CR	0,48	a	0,52	0,42	a	0,45
σ'_p (kN/m ²)	15	a	34	47	a	75
c_{vmed} (SA) (cm ² /s)	1,6E-05	a	5,8E-05	2,4E-04	a	4,3E-04

Considerando que a tensão vertical efetiva assumida no centro da camada turfosa é da ordem de 35 kPa, pelos resultados obtidos tanto em campo quanto em laboratório há indícios que levam a crer que o processo de adensamento primário ainda não foi concluído nessa camada. Essa informação é reforçada pelos baixos valores de coeficiente de adensamento no trecho normalmente adensado do solo virgem (item 7.2.3). Mais adiante serão feitos cálculos para especular qual seria o tempo necessário para a completa dissipação dos excessos de poropressão gerados quando do lançamento do aterro.

7.4

Obtenção de parâmetros a partir dos dados de instrumentação

A instrumentação consistiu de monitoramento de recalques com nível óptico em placas, durante a fase inicial da obra, e em marcos de recalque (pinos

metálicos), como parte do presente projeto de pesquisa. Entre esses dois momentos foi feito um acompanhamento com trena, no desnível existente entre o aterro e estruturas estacadas existentes. Apesar de grosseiro, o procedimento oferece boa concordância com as leituras feitas com precisão na fase inicial e atualmente, conforme mostrado adiante.

Os parâmetros que se pretende obter neste item são o coeficiente de adensamento de campo (pelas leituras na fase inicial) e o coeficiente de compressão secundária corrente (pelas leituras em andamento atualmente). Além destas, outras informações importantes são calculadas, como o recalque ocorrido nos cerca de 30 dias anteriores à instalação das placas de recalque e a previsão de recalque para a data do asfaltamento do pátio, que se deu 7 meses após o fim do monitoramento.

Por fim, de posse de todas essas informações, é apresentada a curva de recalque total ocorrido desde o início da obra até os dias de hoje.

7.4.1

Recalque anterior ao início das leituras

Quando as placas de recalque foram instaladas e o monitoramento começou a ser feito já haviam transcorrido 28 dias desde o início do lançamento do aterro, fazendo com que a leitura zero de recalques ficasse no 28º dia.

Conforme mostrado no capítulo 2, segundo Terzaghi (1943), o trecho inicial da curva de recalque primário, até 52,6% do grau de adensamento, pode ser expresso quase que exatamente pela equação:

$$\rho_t = \sqrt{\frac{4 \cdot c_v \cdot t}{\pi \cdot H_d^2}} \cdot \rho_{pf} \quad (7.3)$$

Fazendo uso da equação acima, que é a equação de uma parábola, é possível estimar o recalque ocorrido antes do início das leituras plotando os valores lidos em função da raiz do tempo, obtendo-se, assim, um trecho aproximadamente retilíneo. Ajustando esses pontos por uma equação linear, o recalque anterior ao

início do monitoramento será dado pelo coeficiente linear desse ajuste, desde que o eixo vertical intercepte o horizontal na data de início do lançamento do aterro.

Outro aspecto a ser considerado em cálculos dessa natureza diz respeito à correção pelo fato de o carregamento não ser instantâneo. Terzaghi apresentou uma solução aproximada para essa questão, propondo que para a interpretação dos resultados as leituras de recalque deveriam ser referenciadas à data correspondente à metade do período construtivo, como se o carregamento tivesse sido instantâneo naquele dia.

Com as informações acima, os dados de monitoramento da placa PR-5 (apresentados no capítulo 3) são plotados em função da raiz do tempo contado a partir do 14º dia (figura 7.15). Ressalta-se que, embora estejam disponíveis 12 meses de leituras, aqui só serão considerados os primeiros 6 meses, com o objetivo de minimizar a possível influência do recalque secundário tanto no presente cálculo quanto no próximo subitem onde será calculado o coeficiente de adensamento.

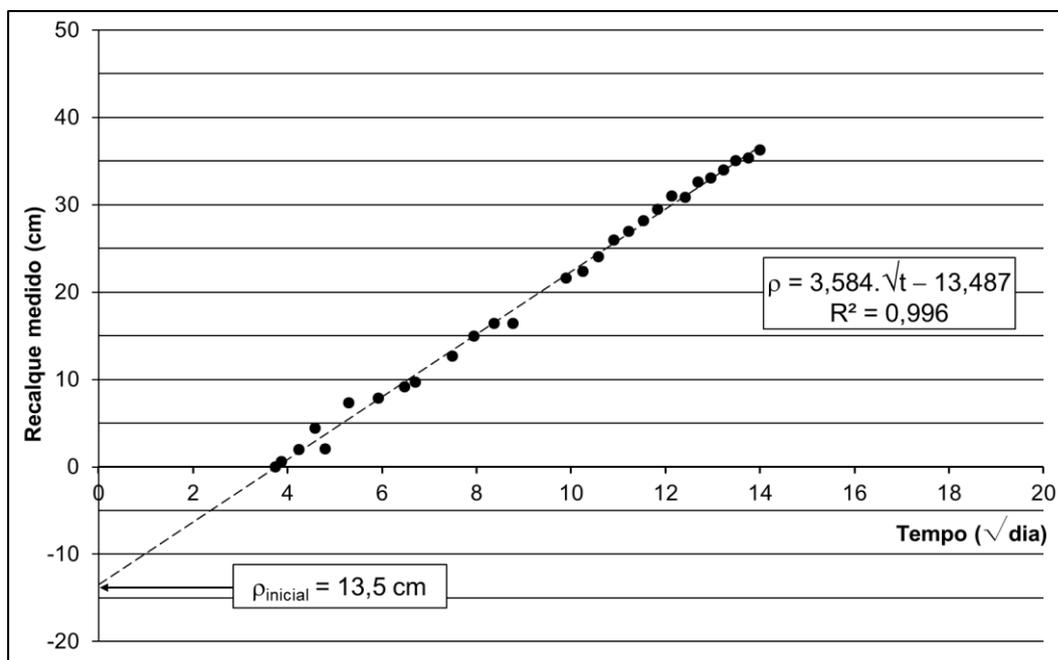


Figura 7.15 – Ajuste para obtenção do recalque antes do início do monitoramento

No gráfico acima é exibido o ajuste linear feito às leituras de recalque, indicando que o recalque anterior ao começo do monitoramento foi de 13,5 cm.

7.4.2

Coeficiente de adensamento

Conforme apresentado no capítulo 2, fazendo uso da equação proposta por Terzaghi (1943) é possível, ainda, obter o coeficiente de adensamento de campo a partir da construção apresentada no subitem anterior. A equação de ajuste apresentada tem a forma

$$c_v = \frac{\pi}{4} \cdot \left(\frac{m \cdot H_d}{\rho_{pf}} \right)^2$$

Para que o c_v possa ser obtido pela equação acima são necessárias três informações: m , distância de drenagem e recalque primário final.

O valor de m foi obtido no subitem anterior, sendo o coeficiente angular da reta de ajuste dos pontos de recalque.

A distância de drenagem é obtida do perfil do terreno mostrado no capítulo 3.

O recalque primário final para as duas camadas em adensamento será calculado mais adiante, sendo apresentado aqui para possibilitar o cálculo.

De posse das informações acima, pode-se calcular a faixa de valores correspondente ao coeficiente de adensamento de campo.

Tabela 7.18 – Valores de c_v obtidos por retroanálise das leituras de placas de recalque

H_d (cm)	ρ_{pf} (cm)	c_v (cm ² /s)
200	120	2,72E-04
200	214	6,27E-05

Pode-se observar que os valores de c_v obtidos pelo presente método se encaixam nas faixas de valores médios obtidos pelos ensaios de campo e laboratório, mostrados na tabela 7.13.

7.4.3

Extrapolação do recalque para a data do asfaltamento

Conforme já citado, o monitoramento foi encerrado cerca de 12 meses após o lançamento do aterro, ocasião em que os recalques ainda se encontravam em franco desenvolvimento. Cerca de 8 meses após o encerramento das leituras (20 meses após o início da obra), o pátio recebeu uma capa asfáltica. É de suma importância para a compatibilização dos recalques medidos após o asfaltamento que se conheça, com tanta exatidão quanto possível, o recalque ocorrido no período sem monitoramento. A teoria de Terzaghi permite esse cálculo desde que se conheça o coeficiente de adensamento do solo, parâmetro esse que foi calculado no subitem anterior.

Calcula-se o fator tempo (T_v) para a data do asfaltamento e com esse valor calcula-se a porcentagem de dissipação média da camada (U_v) pela solução da equação diferencial do adensamento, apresentada no capítulo 2.

Efetuando o cálculo acima se obtém o valor de U (%), que multiplicado pela magnitude do recalque primário final fornece o valor do recalque aos 630 dias. Considerando a faixa de variação do coeficiente de adensamento e dos recalques primários finais considerados pode-se montar a tabela 7.19.

Tabela 7.19– Extrapolação do recalque para a data do asfaltamento

c_v (cm ² /s)	T_v (630 dias)	U_v	ρ_{pf} (cm)	ρ_t (cm)
2,72E-04	0,3706	0,68	125,0	84,4
6,27E-05	0,0854	0,33	214,0	70,6

Logo, somando esse valor com o desnível medido entre as estruturas estaqueadas existentes no pátio obtém-se, tendo em atenção todas as incertezas e imprecisões envolvidas nos cálculos feitos até este ponto, o valor do recalque total ocorrido desde o início da obra.

O autor entende as fragilidades do procedimento aqui descrito, sobretudo devido à ocorrência simultânea dos recalques primário e secundário, situação esta que pode levar a uma superestimativa do coeficiente de adensamento de campo, conforme apontado por Martins (2013). Entretanto, como o objetivo aqui foi a

estimativa de recalques ocorridos durante a fase de obra (240 dias após o fim das leituras), quando o grau de adensamento estava próximo de 50%, acredita-se que a influência do secundário nas extrapolações feitas tenha sido pouco significativa.

7.4.4

Curva de recalque total

Reunindo todas as informações de recalque disponíveis, que são as obtidas acima, o acompanhamento de recalques com trena, mostrado por Sandroni (2012), e os recalques medidos por nivelamento geométrico de precisão do presente trabalho (capítulo 6) (para o ponto M2), é possível construir a curva completa de recalques ocorridos desde o início do lançamento do aterro até os dias de hoje.

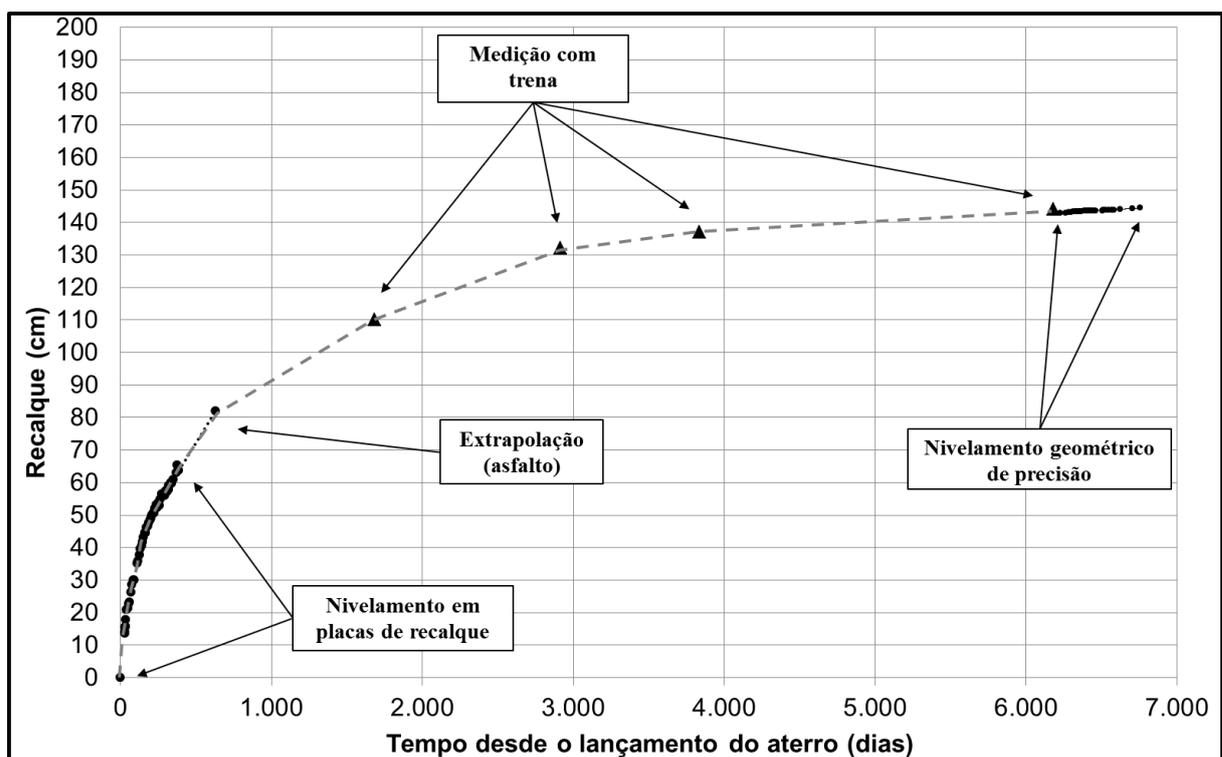


Figura 7.16 – Curva de recalque total desde o início do lançamento do aterro

Com a plotagem dos recalques medidos traça-se “a sentimento” a curva completa de recalques, podendo-se compara-la com outros casos que dispõem de medições semelhantes por longo período, descritos no capítulo 2. A figura 7.17 apresenta essa comparação para o ponto M2 (caixa), com o eixo horizontal (tempo) em escala logarítmica.

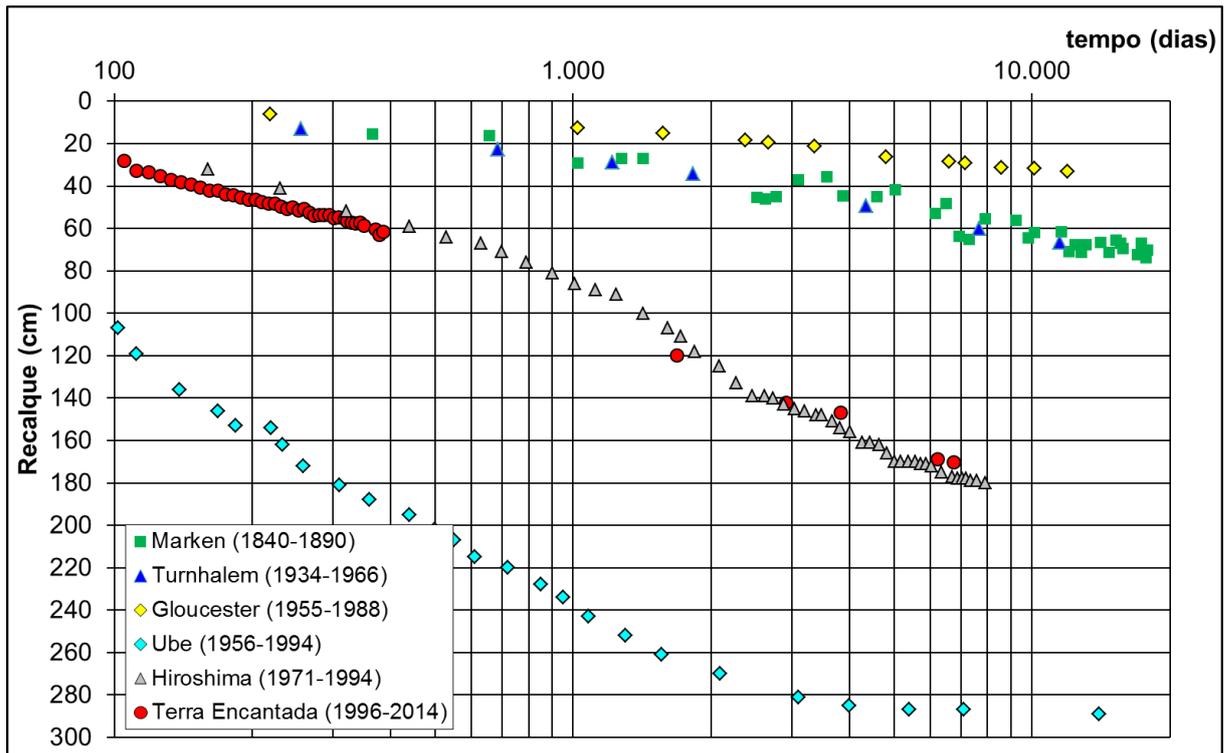


Figura 7.17 – Comparação da curva de recalque total com casos semelhantes da literatura mundial

Por coincidência, o presente caso possui evolução dos recalques muito semelhante a um caso em Hiroshima, descrito por Aboshi (1995), que teve aterro convencional com 11 metros de altura sobre uma camada de argila mole com aproximadamente 25 metros de espessura. Conforme relatado no artigo, a camada mole ainda se encontrava em adensamento primário na ocasião, cerca de 20 anos após a conclusão do aterro.

Pode-se, por fim, fazer uma comparação entre velocidades de recalque correntes dos casos da figura acima, apresentada na tabela 7.20.

Figura 7.20 – Valores de recalque e velocidade de recalque de casos internacionais

Caso	Recalque total (cm)	Intervalo de medição (entre os dias)			Velocidade (mm/ano)
			a		
Marken	~ 100	12.410	a	17.885	1,7
Gloucester	33,1	10.110	a	11.972	2,7
Turnhalen	66,7	7.665	a	11.498	6,4
Ube	289	7.100	a	14.000	1,1
Hiroshima	180	7.580	a	7.910	11,1
Terra Encantada	?	6.226	a	6.757	17,3

7.4.5

Coeficiente de compressão secundária (C_α)

Conforme apresentado no capítulo 2, Jamiolkowski et al. (1985) dividiram a questão do adensamento secundário em duas hipóteses: a hipótese A, que considera que o secundário se inicia após o adensamento primário, e a hipótese B, que considera que existe uma combinação de ambos os processos.

Quando se assume aplicável a hipótese A, torna-se importante o conhecimento do coeficiente de compressão secundária (C_α) para o cálculo de recalques de longo prazo, definido como

$$C_\alpha = \frac{\Delta e}{\Delta \log t} \quad (7.4)$$

Os métodos que fazem uso do parâmetro C_α admitem-no constante, e como consequência direta da curva de adensamento expressa em termos do índice de vazios e do tempo em escala logarítmica tem-se a equação a seguir, que permite o cálculo de recalques após o fim do primário

$$\rho_{\text{sec}} = \frac{C_\alpha}{1 + e_0} \cdot H_0 \cdot \log\left(\frac{t}{t_p}\right) \quad (7.5)$$

O objetivo aqui não é obter magnitude de recalques secundários a partir de determinado valor de C_α , e sim, obter um valor de referência de C_α para

comparação com os valores sugeridos pela literatura. Para isso, suponhamos dois instantes, t_1 e t_2 , após o fim do adensamento primário. Deduz-se facilmente que a diferença entre os recalques ocorridos em t_1 e t_2 pode ser expressa pela equação abaixo

$$\Delta\rho = \frac{C_\alpha}{1 + e_0} \cdot H_0 \cdot \log\left(\frac{t_1}{t_2}\right) \quad , \text{ onde} \quad (7.6)$$

$\Delta\rho$ – recalque ocorrido entre t_1 e t_2 ;

t_1, t_2 – tempos considerados.

Agora, os recalques medidos por nivelamento geométrico de precisão durante o presente trabalho serão plotados em função do tempo a contar do início das leituras (os últimos 21 meses), sendo ajustados por uma equação logarítmica pelo método dos mínimos quadrados. O procedimento será exemplificado com as medições do ponto M0, cuja evolução do recalque no tempo foi apresentada no capítulo 6.

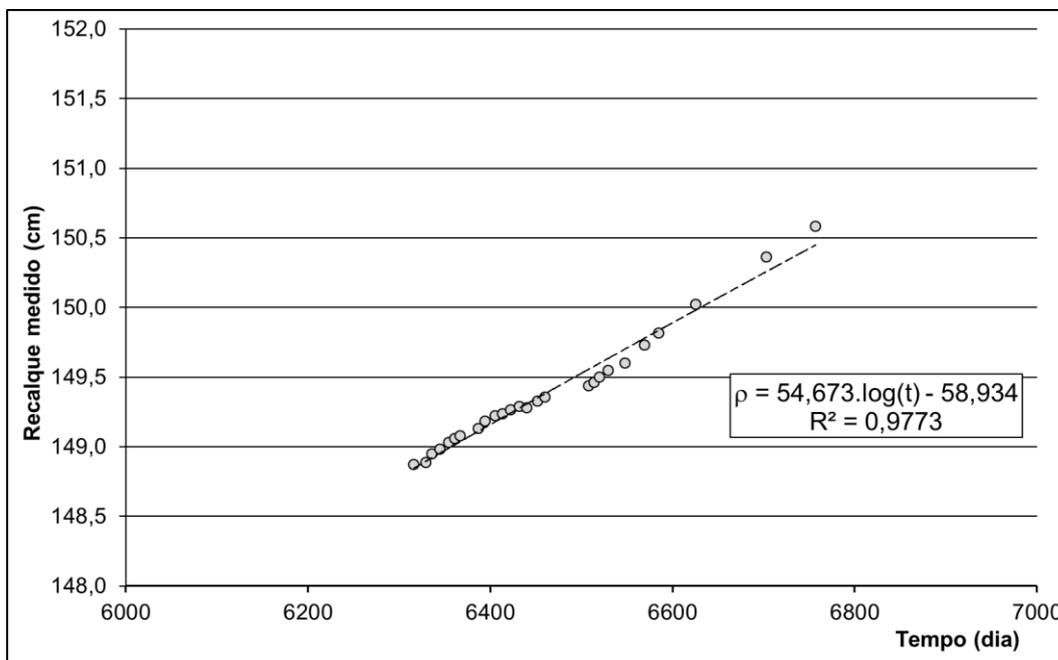


Figura 7.18 – Ajuste logarítmico às leituras de nivelamento geométrico de precisão

O coeficiente linear do ajuste é irrelevante para os cálculos aqui desenvolvidos, pois não diz respeito à relação entre as leituras e sim à intersecção da curva de ajuste com o eixo horizontal.

Comparando a equação de ajuste obtida na figura acima com a equação para cálculo do recalque secundário, pode-se extrair a igualdade

$$\frac{C_{\alpha}}{1 + e_0} \cdot H_0 = 54,673$$

Considerando a espessura da camada mole em adensamento como $H_0 = 400$ cm, obtém-se:

$$\frac{C_{\alpha}}{1 + e_0} = \frac{54,673}{400} = 0,137$$

Repetindo-se o procedimento para os três pontos monitorados no Local 1 (capítulo 6), pode-se montar a tabela 7.21 com os valores do parâmetro.

Figura 7.21 – Valores de coeficiente de compressão secundária obtidos

Ponto	Recalque recente (mm)	Coefficiente angular	Espessura mole (cm)	$C_{\alpha} / 1+e_0$
M0	17,7	54,673	400	0,137
M1	15,1	64,079	400	0,160
M2	10,7	36,83	400	0,092

Prosseguindo com a especulação, pode-se dividir o valor de $C_{\alpha}/1+e_0$ calculado acima por valores de razão de compressão limite (apresentados no item 7.2.3), e assim obter a relação C_{α}/C_c , que Mesri e Godlewski (1977) imodestamente apontaram como sendo esta uma propriedade do solo, válida para qualquer combinação de tempo, tensão efetiva ou índice de vazios. De acordo com os autores esse seria um postulado ou, ainda, como batizou Mesri (1987), “A Quarta Lei da Mecânica dos Solos: a Lei da Compressibilidade”.

A tabela 7.22 apresenta os valores das relações C_a/C_c para cada ponto monitorado, e a tabela 7.23 mostra os valores limite propostos por Mesri, Lo e Feng (1994), segundo os autores válidos para todo material geotécnico.

Figura 7.22 – Valores médios da relação C_a/C_c para a camada

Ponto	$C_a / 1+e_0$	$C_c / 1+e_0$			C_a / C_c		
			a			a	
M0	0,137	0,38	a	0,61	0,22	a	0,36
M1	0,160	0,38	a	0,61	0,26	a	0,42
M2	0,092	0,38	a	0,61	0,15	a	0,24

Figura 7.23 – Valores limite de C_a/C_c (Mesri et al., 1994)

Material	C_a / C_c
Solos granulares, incluindo enrocamento	$0,02 \pm 0,01$
Folhelho	$0,03 \pm 0,01$
Argilas inorgânicas e siltes	$0,04 \pm 0,01$
Argilas orgânicas e siltes	$0,05 \pm 0,01$
Turfas	$0,06 \pm 0,01$

Comparando as duas tabelas acima, observa-se que o solo em estudo não obedece ao “postulado” proposto.

Ainda que se argumente que o valor das relações apresentadas tenham sido majorados pois os C_c estão mais baixos do que deveriam, tendo em vista os ensaios terem sido feitos em corpos de prova de baixa qualidade (conforme explanado no capítulo 5), Ladd (1973) diz que, de maneira geral, os solos amolgados exibem menor valor de C_a/C_c do que os solos indeformados.

Neste momento cabem algumas considerações.

O problema aqui em estudo envolve um aterro sobre dois solos moles com características bastante distintas. O valor obtido acima representa uma razão de compressão secundária equivalente para a camada mole como um todo. Nesse ínterim, parece lícito admitir que: ou os dois solos possuem o mesmo valor para esse parâmetro ou esse valor é médio, implicando que um dos solos possuiria valor ainda mais alto.

Para que esse parâmetro pudesse ser individualizado para cada um dos solos em estudo seria necessário que as medições de recalque também fossem individualizadas, situação que não foi implementada na presente pesquisa. Porém cabe comentar que, caso as leituras de recalque sejam particularizadas, as espessuras H_0 também o serão, e como os valores serão menores a tendência é que os valores de $C_c/(1+e_0)$ fiquem ainda maiores.

7.5

Análise da magnitude dos recalques – compressão

Neste item serão utilizadas as informações apresentadas nos itens anteriores para estimar qual magnitude de recalque total – primário e secundário – deve ser esperada para o carregamento imposto no terreno em estudo. Será calculado, também, o recalque ocorrido desde o início do lançamento do aterro até o presente momento, empregando para isso procedimentos distintos. Por fim, os valores obtidos serão comparados para que se possa aquilatar qual magnitude de compressão ainda resta para se desenvolver.

7.5.1

Recalque final (primário + secundário)

O recalque final é aquele que terá ocorrido no solo quando tiver transcorrido um tempo infinito desde o início da atuação do carregamento. Serão empregados três procedimentos diferentes para estimar toda a magnitude de recalque a ser esperada para o terreno.

7.5.1.1

Através de formulações específicas

Possivelmente a maneira mais empregada na prática para se estimar o recalque primário seja por meio da consagrada fórmula bilinear logarítmica

apresentada a seguir. Sua demonstração é trivial ao se observar a curva de compressão do solo, expressa por σ'_v (log) x e_0 .

$$\rho_{pf} = H_0 * \left[\frac{C_R}{1+e} \cdot \log\left(\frac{\sigma'_p}{\sigma'_{vo}}\right) + \frac{C_c}{1+e} \cdot \log\left(\frac{\sigma'_{vf}}{\sigma'_p}\right) \right] \quad (7.7)$$

A fórmula tem grande aplicação pois, conhecidas as tensões verticais efetivas inicial e final e a espessura da camada de solo mole, os demais parâmetros envolvidos podem ser obtidos por correlações: $C_c/1+e_0$ e $C_r/1+e_0$ correlacionam-se com a umidade e σ'_p correlaciona-se com parâmetros oriundos dos ensaios de palheta ou piezocone, por exemplo.

Cabe observar que essa fórmula não leva em consideração a diminuição da compressibilidade (C_c) à medida que as tensões aumentam, conduzindo a uma superestimativa do valor do recalque calculado. Como a tensão final no presente caso não é alta, espera-se que essa situação seja amenizada.

Aqui serão usadas as faixas de parâmetros obtidas no item anterior, que englobam uma análise conjunta de ensaios de campo e laboratório.

Já para a consideração do recalque secundário, será usada a formulação apresentada por Bjerrum (1972), mostrada no capítulo 2 (subitem 2.4.2), e os gráficos lá apresentados. Entrando nesses gráficos com os valores obtidos de índice de plasticidade para o solo em estudo (que foram todos superiores a 100 tanto para os ensaios realizados antes da obra em Terra Encantada quanto para os terrenos vizinhos), chegamos ao valor limite superior dos gráficos, de $OCR_{sf} = 2,0$. Cumpre salientar que, embora Bjerrum não tenha estendido sua correlação a valores de IP maiores do que 100, pode-se intuir que a curva tende a se tornar assintótica a um valor próximo a $OCR = 2,0$.

Seguindo o mesmo princípio de Feijó e Martins (1993), o autor desenvolveu estudo semelhante com vistas a obter o valor de OCR de descarregamento para o qual a compressão secundária não voltaria a ocorrer nos solos aqui em estudo, conforme mostrado no capítulo 5 (figuras 5.42 a 5.44). Nas figuras vê-se que o comportamento com relação à compressão secundária dos dois solos (turfoso e argiloso) foi concordante com os resultados de Feijó e Martins (1993) e Andrade

(2009). A diferença foi que naqueles solos o OCR de fim de secundário ficou em torno de 2,0 e nos ensaios aqui desenvolvidos ambos os solos voltaram a experimentar compressão secundária para esse mesmo OCR, sendo que o solo turfoso voltou a comprimir mesmo para um $OCR = 2,4$, em relação à curva de fim de primário. Esse comportamento indica que o OCR_{sf} seria maior do que os valores limite encontrados tanto para os estudos de laboratório realizados quanto para a curva apresentada por Bjerrum.

Por esse fato, uma de duas conclusões pode ser tirada: ou os solos aqui em estudo são propensos à recalques secundários de grandes magnitudes ou então o procedimento de laboratório empregado não deve ser usado para a obtenção de OCR_{sf} neste depósito, pois isso conduziria à magnitudes de recalque secundário exageradas em comparação às já observadas em outros aterros na região (Sandroni 2012, 2014).

Face o exposto, decidiu-se adotar o valor de $OCR_{sf} = 2,0$ para o cálculo de recalques neste item, de modo a não se afastar sobremaneira do valor limite verificado para outros solos.

Logo, as fórmulas citadas foram implementadas em planilha eletrônica e os cálculos de recalque efetuados dividindo a camada mole em subcamadas de 0,5 metros de espessura. De modo a considerar as situações de recalque máximo e mínimo, os parâmetros de entrada usados em cada análise são apresentados juntamente com os resultados na tabela 7.24.

Tabela 7.24 – Cálculo do recalque final pela fórmula

	Camada	CR	σ'_p (kN/m ²)	ρ_{pf} (cm)		ρ_{sf} (cm)		ρ_{total} (cm)
Caso 1	Turfosa	0,43	10	69,2	124,9	25,89	48,8	173,7
	Argilosa	0,38	10	55,8		22,88		
Caso 2	Turfosa	0,61	3	138	257,8	36,73	70,4	328,2
	Argilosa	0,56	3	119,8		33,72		

Ressalta-se que os cálculos foram feitos levando em conta o efeito de submersão do aterro explicado no capítulo 2.

7.5.1.2

Através da curva de compressão reconstituída

Embora a fórmula apresentada no subitem anterior seja amplamente empregada, ela reduz o comportamento do solo a um modelo bilinear logarítmico, o que trata-se de uma simplificação para possibilitar o cálculo de recalque mesmo que não existam ensaios de adensamento oedométrico.

Mas quando estão disponíveis as curvas de compressão do solo, o uso da fórmula torna-se dispensável uma vez que, conhecidos os valores das tensões verticais efetivas inicial e final e a espessura da camada, basta obter a variação do índice de vazios correspondente ao incremento de carga e empregar a relação abaixo para calcular o recalque.

$$\Delta H = H_0 \cdot \frac{\Delta e}{1 + e_0} \quad (7.8)$$

Baseado neste simples princípio e nas curvas de compressão dos solos em estudo reconstituídas anteriormente, serão calculados os valores de recalque primário e secundário correspondentes ao incremento de tensão efetiva imposto ao solo quando do lançamento do aterro. Acrescenta-se a essas curvas a posição da “linha de fim de compressão secundária”, conforme nomenclatura dada por Martins et al. (1997). Esta linha é traçada paralelamente à linha de fim de primário e indica o fim do processo de compressão, alcançado em tempo infinito quando a velocidade de deformação seria nula. Segundo explicado no item anterior, a posição dessa linha foi adotada como a correspondente a um $OCR = 2,0$.

As curvas reconstituídas (figura 7.19) indicam a posição das tensões verticais efetivas envolvidas e o valor dos índices de vazios inicial (e_0), ao fim do primário (e_{pf}) e ao fim do secundário (e_{sf}).

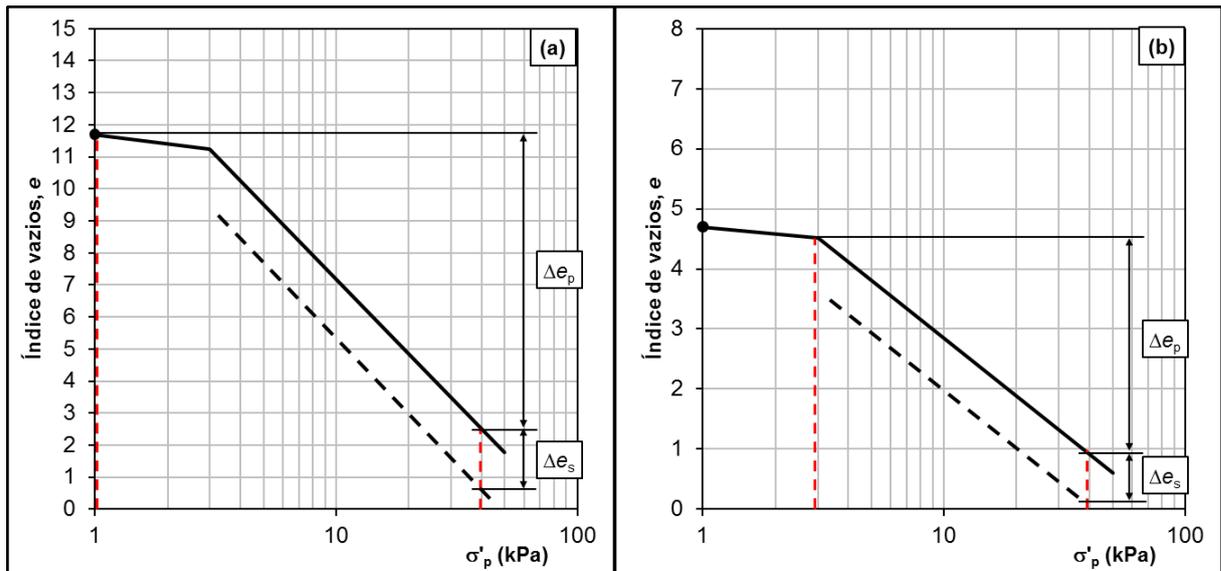


Figura 7.19 – Cálculo da variação de índice de vazios para o carregamento imposto pelo aterro
(a) curva para o solo turfoso ; (b) curva para o solo argiloso

De posse dessas curvas e da tensão vertical efetiva inicial e final no centro de cada camada, pode-se calcular prontamente a magnitude do recalque final em cada camada de solo, separando-os em primários e secundários, a partir da equação citada. A tabela 7.25 mostra os resultados obtidos.

Tabela 7.25 – Cálculo de recalque final pela variação de índice de vazios

	Curvas superiores		Curvas inferiores	
	Turfa	Argila	Turfa	Argila
e_0	14,40	6,70	11,70	4,70
Δe_{total}	3,60	2,79	6,22	4,61
Δe_{prim}	2,67	2,01	5,19	3,77
Δe_{sec}	0,93	0,78	1,03	0,84
r	0,74	0,72	0,83	0,82
$\Delta e / (1 + e_0)$	0,23	0,36	0,49	0,81
H_0 (m)	2,0	2,0	2,0	2,0
ΔH (m)	0,47	0,72	0,98	1,62
ΔH_{total}	1,19 m		2,60 m	

7.5.1.3

Através do método de Asaoka

Aqui, assume-se como hipótese que o método de Asaoka (1978) pode ser usado para o cálculo do recalque final, considerando somente os pontos de recalque medidos por nivelamento geométrico de precisão. Tal hipótese encontra amparo em Sousa Pinto (2001), que apontou que o método é absolutamente correto para fenômenos que possam ser expressos por meio de uma equação exponencial, situação que se verifica após terem se desenvolvido 52,6% dos recalques primários, segundo a teoria clássica. Como se observou a seguir, os recalques que estão sendo medidos atualmente em Terra Encantada – sejam eles primários, secundários ou uma combinação de ambos – podem ser ajustados com boa concordância por uma equação exponencial.

Aplicando, então, esse procedimento, na figura 7.20 pode-se observar o gráfico $\rho \times t$, onde a contagem do tempo é feita a partir da data de lançamento do aterro. Na figura está exibido, ainda, um ajuste logarítmico (feito pelo método dos mínimos quadrados) às medições de recalque e seu respectivo coeficiente de determinação (R^2).

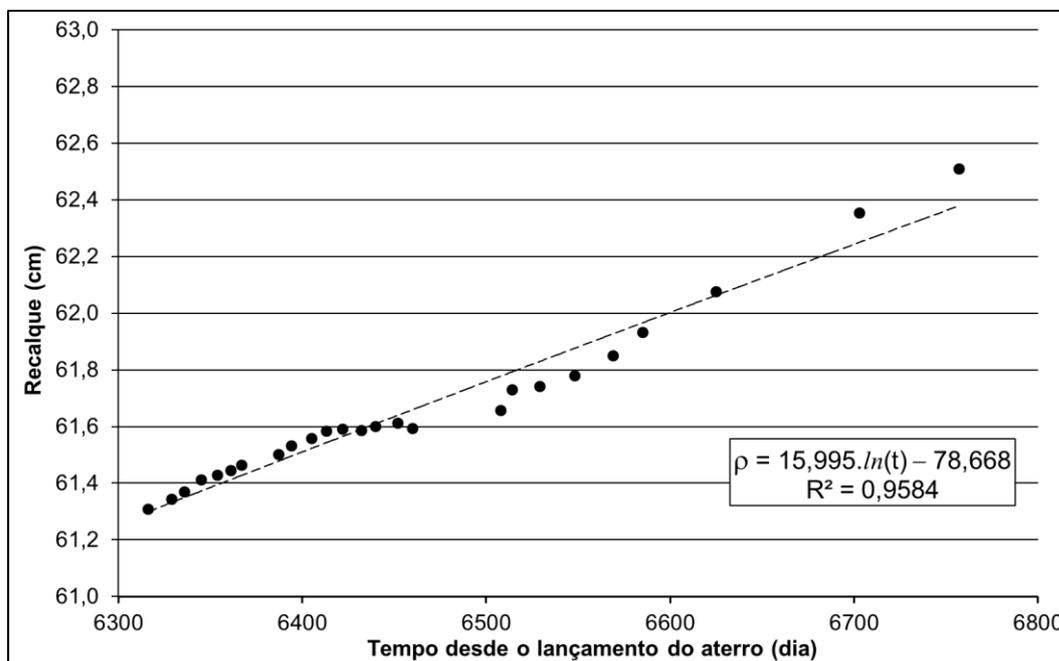


Figura 7.20 – Ajuste logarítmico aos dados de monitoramento de recalque

Prosseguindo com o método, adotou-se o intervalo de tempo de **60 dias** e plotou-se a reta mostrada na figura 7.21.

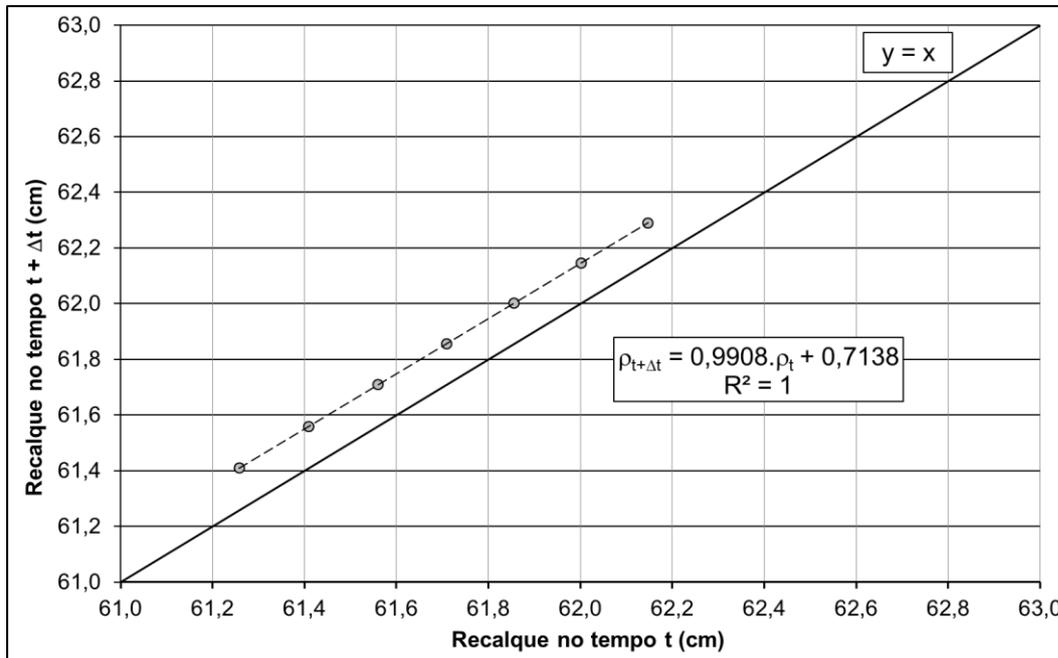


Figura 7.21 – Ajuste linear aos pontos seguindo o método de Asaoka

Aplicando a formulação apresentada no capítulo 2 pode-se calcular o recalque final em relação à origem dos tempos adotada anteriormente.

$$\rho_{sf} = \frac{b}{1-a} = \frac{0,7138}{1-0,9908} = 77,6cm$$

Somando o valor de recalque aqui obtido com o recalque ocorrido antes da pavimentação (82 cm), chega-se a um valor de recalque final de 159,6 cm.

Pelo valor obtido, percebe-se que ele se encontra dentro da faixa recalque fornecida pela estimativa a partir da curva de compressão reconstituída, porém está abaixo do valor mínimo estimado com o uso das fórmulas, conforme item 7.5.1.1.

7.5.2

Recalque atual

Neste item serão apresentados três procedimentos para se obter a magnitude de recalque ocorrida no local em estudo desde o lançamento do aterro, em abril de 1996, até os dias de hoje.

7.5.2.1

Pelas medições de recalque desde o início da obra

Este é o único método direto para se obter com precisão os recalques ocorridos em aterros sobre solos compressíveis. Conforme a curva apresentada no item 7.4.4, o recalque atual ocorrido no terreno é da ordem de 144 cm.

A questão que torna o método mais sujeito a imprecisões no presente caso é o fato de as leituras em placas de recalque terem sido feitas em local diferente do aqui em estudo, onde foram feitas as medições com trena, o nivelamento geométrico e as sondagens e a coleta de amostras para ensaios em laboratório. A figura 7.22 abaixo indica esses locais, suas distâncias e o desnível por ocasião do levantamento planialtimétrico feito na presente pesquisa (em azul).

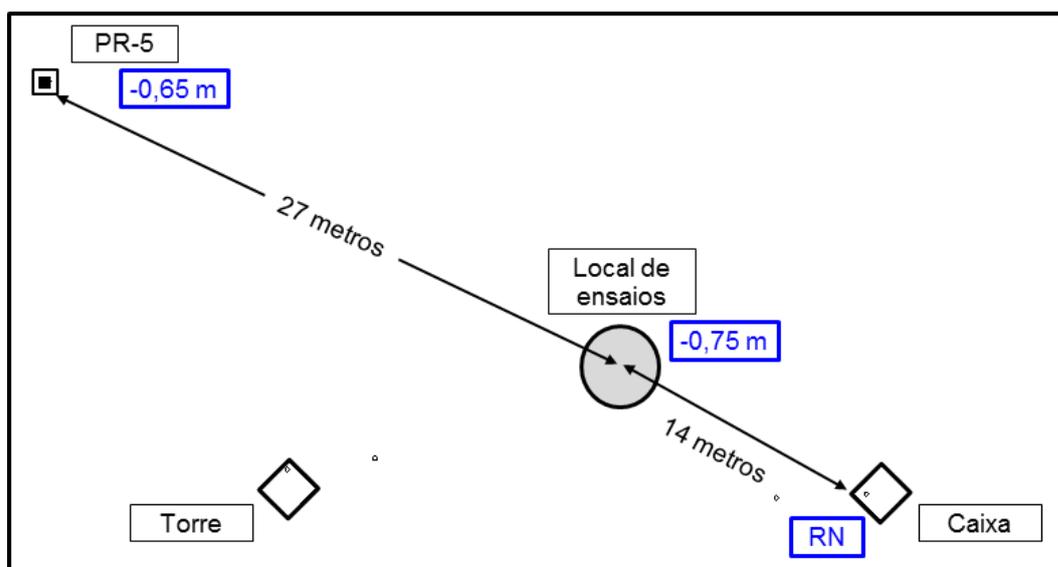


Figura 7.22 – Croqui com distâncias e desníveis entre a antiga posição da placa de recalque e o local de estudo

O desnível no local onde estava instalada a placa de recalque PR-5 é de 65 cm, praticamente o mesmo desnível medido próximo à caixa onde foi feito o acompanhamento à trena (61 cm em 2013). Logo, como a espessura de solo mole é a mesma nesses locais, será assumido aqui que evolução do recalque na caixa foi a mesma da placa PR-5.

Sobre o local onde foram feitas as sondagens recentes e as coletas de amostra, o desnível é de 75 cm, 10 cm a mais do que nos outros locais. Novamente será assumido que a evolução dos recalques é semelhante à da placa PR-5, só que sua magnitude foi um pouco maior. Como nos próximos itens os cálculos de recalques serão feitos com base nessa região, o recalque total medido desde o início da obra será tomado 10 cm maior do que o mostrado na figura 7.16. Logo, esse valor será de 155 cm.

7.5.2.2

Pela variação de índice de vazios

Emprega-se aqui um procedimento indireto para o cálculo dos recalques ocorridos fazendo uso apenas da variação de índice de vazios ocorrida entre 1996 (ano de lançamento do aterro) e 2013 (ano de retirada das amostras indeformadas). Conhecida a espessura inicial de cada camada de solo mole envolvida, a fórmula já apresentada em 7.4.1.2 permite a obtenção do recalque ocorrido em cada uma delas. A tabela 7.26 apresenta as faixas de valores máximos e mínimos antes e após o carregamento, e os recalques calculados por esse método.

É interessante notar que esse procedimento de verificação de recalque através da comparação entre os índices de vazios antes e após o carregamento possui vantagens, pois só requer ensaios de laboratório simples e rápidos como determinação do teor de umidade – antes e após – e da densidade real dos grãos, que em verdade só precisa ser feito uma vez, já que não há quebra de grãos no processo. Outra grande vantagem é que não há preocupação com relação ao amolgamento das amostras, já que este é um processo não drenado, que destrói a estrutura do solo (alterando sua compressibilidade) mas não afeta o índice de

vazios. Com isso os ensaios de laboratório para esse fim podem ser feitos em amostras oriundas de sondagens, desde que preservadas as umidades.

Tabela 7.26 – Cálculo do recalque ocorrido desde o lançamento do aterro pela variação do índice de vazios

	Turfa			Argila		
e_0	11,7	a	14,4	4,7	a	6,7
e_{atual}	5,3	a	5,6	3,1	a	3,2
Δe_{total}	6,1	a	9,1	1,5	a	3,6
$\Delta e / (1 + e_0)$	0,40	a	0,72	0,19	a	0,63
H_0 (m)	2,0			2,0		
ΔH (m)	0,79	a	1,43	0,39	a	1,26
ΔH_{total} (m)	1,18 m			a	2,70 m	

Tendo em vista que esse procedimento não demanda nenhuma ação no intervalo de tempo que separa o carregamento e o presente nem tampouco o conhecimento de quaisquer parâmetros (exceto os necessários para o cálculo dos índices de vazios, tais como umidade, densidade real dos grãos e peso específico saturado), é interessante notar que a ordem de grandeza dos recalques aqui calculados é a mesma da obtida através das medições continuadas desde o lançamento do aterro até os dias de hoje.

7.5.2.3

Pela posição da base da camada mole e do nível d'água

Outra maneira possível para se estimar a magnitude dos recalques ocorridos no aterro em estudo exige que sejam aceitas duas hipóteses: tanto a base da camada de solo mole quanto o nível d'água (NA) se mantiveram na mesma posição desde que o aterro foi lançado. Conforme mostrado no capítulo 3, abaixo do solo mole superficial existe uma camada de areia com 7 a 10 metros de espessura e, sotoposta a esta, uma camada de argila arenosa com cerca de 4 metros de espessura e $SPT > 3$. Levando em conta o carregamento imposto, se houve recalque nessa camada argilosa inferior parece bastante razoável admitir que este tenha sido pouco ou nada significativo diante do recalque da camada

superior. Quanto à hipótese da manutenção da posição do NA, não há razões objetivas que a sustentem, sendo essa apenas uma consideração de cunho prático.

A figura 7.23 a seguir mostra um perfil esquemático com três momentos do solo superficial do terreno: antes do lançamento do aterro, no instante do lançamento e nos dias atuais. A figura 7.3 indica que o local em estudo se encontra entre as curvas de isoespessura de 4,0 e 5,0 metros, e a figura 7.24 mostra que o local dista 27 metros da placa PR-5, onde a sondagem anterior ao aterro indicou que a espessura do solo mole era de 4,5 metros (Geoprojetos, 1997). Considerando que a espessura da camada mole apresenta pouca variabilidade no entorno do local, a espessura na figura está representada por um valor médio entre 4,0 e 4,5 m.

Chama-se a atenção para a representação no instante “ $t = 0$ ”, onde se considerou, que o aterro foi lançado instantaneamente. Na realidade o serviço durou cerca de 30 dias, e ao fim desse período já havia ocorrido algum recalque. Essa representação não interfere na estimativa em curso aqui.

Pelas figuras, pode-se observar que, aceitas as hipóteses citadas, a posição do nível d'água dá a informação de que o aterro recalcou 2,30 metros no local considerado, onde foram realizadas as sondagens recentes e retiradas as amostras ensaiadas em laboratório.

Outra informação é dada pela posição da base da camada mole, aqui admitida como estática. As sondagens recentes (4 piezocones e uma tradagem para a instalação do poço de monitoramento) indicaram que a espessura da camada mole atualmente é de 2,0 metros. Como a espessura inicial dessa camada estava entre 4,0 e 4,5 metros, o recalque ocorrido estaria entre 2,0 e 2,5 metros.

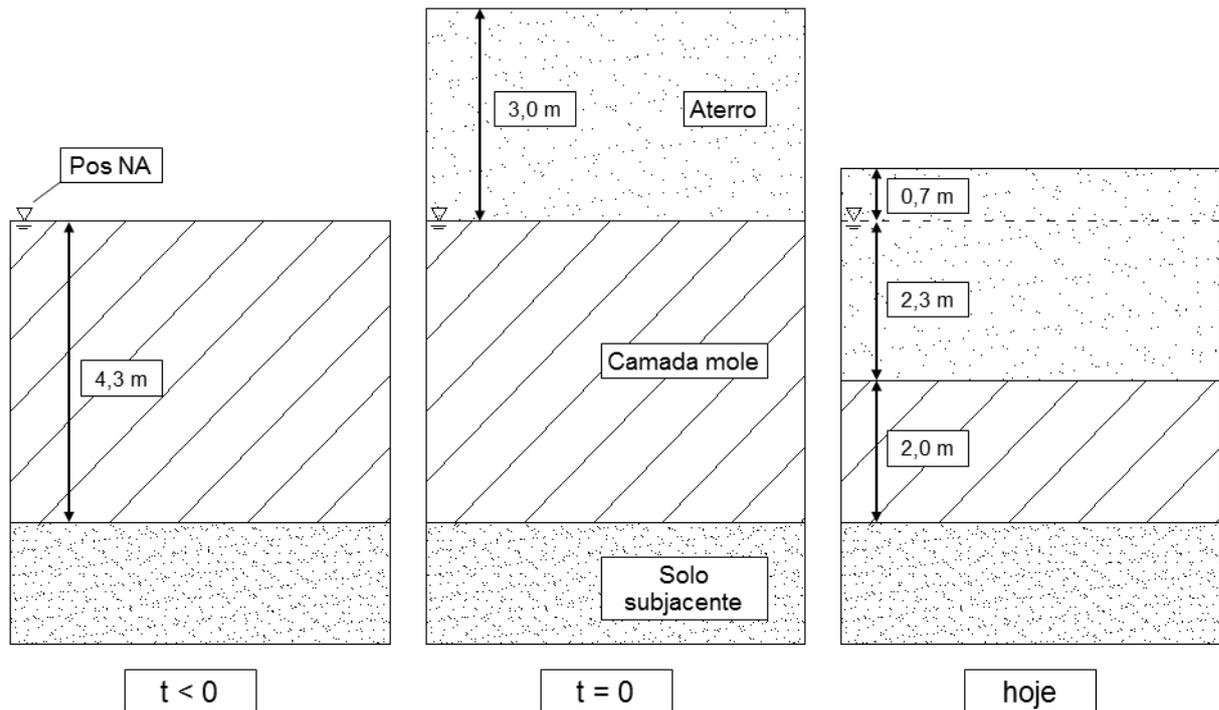


Figura 7.23 – Perfil esquemático com a compressão da camada mole e a posição do NA

7.5.3

Considerações sobre a magnitude dos recalques

A seguir é apresentado um resumo dos recalques final e atual calculados anteriormente por diferentes métodos (tabela 7.27).

Sobre os valores obtidos, observa-se que a faixa é bastante ampla e alguns valores parecem pouco razoáveis de serem admitidos. O máximo valor de recalque total estimado foi de 328,2 cm, o que parece um tanto exagerado já que isso implicaria que a camada mole sofreria deformação de 82 %. Já o valor mínimo estimado, 119,2 cm, é demasiadamente baixo, sobretudo pelo fato de que já foram medidos, no mínimo, 155 cm de recalques, conforme apresentado.

Tabela 7.27 – Comparação entre o recalque final estimado e o recalque atual

Recalque final estimado							
Método	Fórmula			Curva reconstituída			Asaoka
item	7.5.1.1			7.5.1.2			7.5.1.3
Primário (cm)	124,9	a	257,8	86,9	a	214,0	-
Secundário (cm)	48,8	a	70,4	32,3	a	45,7	-
Total (cm)	173,7	a	328,2	119,2	a	259,7	159,6
Recalque atual							
Método	Medições			Varição índice de vazios			Posição NA
item	7.5.2.1			7.5.2.2			7.5.2.3
Total (cm)	155,0			118,2	a	269,6	230,0

Com o objetivo de estreitar a amplitude de valores, esses valores extremos serão descartados e, em seu lugar, serão tomados os valores médios daquela faixa, o que resulta na tabela 7.28 a seguir.

Tabela 7.28 – Estreitamento da faixa a ser adotada para o recalque final

Recalque final a ser adotado							
Método	Fórmula			Curva reconstituída			
item	7.5.1.1			7.5.1.2			
Primário (cm)	124,9	a	191,3	150,4	a	214,0	
Secundário (cm)	48,8	a	59,6	39,0	a	45,7	
Total (cm)	173,7	a	250,9	189,5	a	259,7	

Para os recalques ocorridos até o presente momento, dois valores estão conflitantes, apesar de se enquadrarem na faixa prevista pela variação de índice de vazios: o recalque obtido por medições e o obtido pela altura de aterro acima do nível d'água. A diferença de 75 cm entre os recalques obtidos pelos dois métodos é bastante significativa para ser atribuída exclusivamente a imprecisões nos cálculos. Algumas causas possíveis podem explicar a contradição:

- (i) O nível d'água não estava na superfície do terreno quando do início da obra, conforme apontado por Sandroni (2001), mas acima, fazendo com que o aterro submerso não corresponda ao recalque ocorrido;

- (ii) O nível d'água subiu nos últimos 18 anos, implicando na mesma consequência anterior;
- (iii) As datas assumidas como de início do lançamento do aterro não são exatas, fazendo com que o recalque anterior ao início do monitoramento nas placas seja maior do que o aqui calculado;
- (iv) A camada argilosa inferior sofreu recalques que não podem ser desprezados conforme assumido aqui. Com isso a base da camada mole próxima à superfície não permaneceu na mesma posição, novamente implicando que a porção submersa do aterro não corresponda ao recalque ocorrido;
- (v) As imprecisões associadas ao uso dos dados da placa de recalque PR-5 no local em estudo trazem mais erros do que os aqui admitidos (tanto nos recalques quanto na espessura inicial da camada mole assumida).

O autor acredita que, caso os itens (i) e (iv) tenham participação na discrepância observada, suas contribuições sejam pequenas.

Em relação ao item (ii) cabem duas observações. Quando do espalhamento inicial do material de aterro sobre solos muito moles é comum a formação de “ondas” na camada de solo superficial, as chamadas *mudwaves*. Quando essas *mudwaves* se localizam na periferia do aterro, elas podem atuar como diques, dificultando ou até mesmo bloqueando a saída de água, tendo como consequência, a elevação do nível d'água sob o aterro (Sandroni, 2014). Outro aspecto que poderia ensejar evento semelhante ocorre em aterros de grandes dimensões, como o aqui em estudo. Os pontos centrais do aterro necessariamente devem ter nível d'água mais elevado do que nas extremidades, pois do contrário não haveria gradiente hidráulico para possibilitar o fluxo horizontal pelo colchão drenante (no caso o aterro arenoso). Logo, em 90 metros – que é a menor distância do local em estudo até a periferia – bastaria um gradiente de 0,8% para induzir uma subida de 72 cm no nível d'água.

Sobre o item (iii), ainda que as datas não sejam exatas o recalque estimado para os 28 dias anteriores ao início do monitoramento foi de 13,5 cm. Caso o aterro tenha sido iniciado 28 dias antes da data estimada como de início do

lançamento – e aqui cabe ressaltar que a incerteza não é tão grande assim – a ordem de grandeza do erro no recalque seria dessa mesma magnitude. Esse valor ainda não explica toda a discrepância observada.

Entretanto, as informações disponíveis deixariam pouca dúvida com relação à magnitude dos recalques ocorridos, que seria a diferença entre as espessuras inicial e atual da camada mole. É nesse sentido que se aplica o item (v) anterior, pois a espessura inicial assumida pode não ser a correta para o local em estudo. Isso poderia ser devido, novamente, à formação de *mudwave*, que pode tanto aumentar quanto diminuir a espessura da camada localmente, já que se trata de um processo não drenado e, correspondente à crista da onda, é gerado um vale à sua retaguarda.

O objetivo do presente item é chegar a um valor para ser tomado como representativo dos recalques ocorridos desde o início do lançamento do aterro. As imprecisões devidas aos itens (ii) e (v) fariam com que o recalque fosse menor do que a faixa de 200 a 250 cm. Já a imprecisão no item (iii) faria com que o recalque fosse maior do que os 155 cm medidos até o presente momento.

Logo, será assumido como partido de cálculo que o recalque ocorrido no aterro desde seu lançamento é próximo à média entre o recalque medido (155 cm) e o valor inferior do recalque estimado pela diferença de espessuras da camada (200 cm). O valor a ser usado deste ponto em diante é, portanto, de 175 cm.

De posse dessa magnitude de recalque, observa-se novamente a tabela 7.28 e verifica-se que o valor inferior é menor do que o recalque assumido no parágrafo anterior. Novamente como partido de cálculo, os valores de recalque final da tabela citada serão representados por seu valor central, o seja, o recalque final deste ponto em diante será admitido entre 212 cm e 225 cm.

Com isso, restariam a ocorrer no terreno em estudo entre 37 cm e 50 cm de recalque.

7.6

Análise do tempo dos recalques – adensamento

Neste item são apresentadas algumas considerações que objetivam estimar a evolução dos recalques ao longo do tempo, indicando quando a compressão da camada de solo mole chegará ao final.

Esta tarefa é dificultada pois o coeficiente de adensamento vertical (c_v), parâmetro que rege o desenvolvimento do recalque no tempo, apresentou enorme variabilidade nos ensaios de campo e laboratório realizados, como foi apresentado no item 7.2.3.

Outro aspecto que traz complicações adicionais à questão do adensamento diz respeito ao fato de a camada mole em estudo ser composta por dois solos com comportamentos bastante distintos, que dividem uma interface onde não se pode ter certeza da exata condição de drenagem que ocorre ali.

Por essas razões, o que se apresenta nos próximos itens deve ser encarado apenas como conjectura.

7.6.1

Dissipação dos excessos de poropressão

Apesar de toda incerteza que cerca o solo em estudo, serão admitidas algumas situações limite para o cálculo do tempo necessário para o fim do adensamento primário da camada mole como um todo.

De início, é preciso definir um critério para o que se chamará de “fim do adensamento primário”. Para os cálculos que aqui se apresentam, esse valor será arbitrado como $U = 95\%$.

Para os cálculos, serão assumidas duas hipóteses de trabalho:

- 1) Que a interface entre as duas camadas é impermeável, ocorrendo drenagem simples simultânea e independentemente para ambas, a superior drenando pelo topo e a inferior pela base;

- 2) Que a camada inferior tem drenagem simples pela base até atingir $U = 95\%$ e após isso a camada superior inicia sua dissipação com drenagem dupla.

Como a metade superior da camada mole é composta pelo solo turfoso e a metade inferior pelo solo argiloso, a primeira hipótese equivale matematicamente a considerar duas situações extremas: que toda a camada é turfosa com drenagem dupla e que toda a camada é argilosa com drenagem dupla. Embora não se conheça a real condição de drenagem na interface entre as camadas, certamente o tempo necessário para a dissipação dos excessos de poropressão está entre essas duas situações.

Assumidas as hipóteses com vistas a delimitar a questão relativa à incerteza da condição de drenagem na interface entre camadas, resta agora assumir valores representativos para a grande variabilidade encontrada nos coeficientes de adensamento de cada solo.

Para isso serão adotados os valores limite para o solo virgem apresentados no item 7.2.3 onde foram mostrados valores obtidos a partir de ensaios de laboratório (valores diferentes para as camadas turfosa e argilosa) e a partir de ensaios de campo (valor médio para a camada como um todo), conforme resumido na tabela 7.29.

Tabela 7.29 – Coeficientes de adensamento adotados

Camada	c_v lab (cm²/s)	c_v campo (cm²/s)
Turfosa	5,63E-06	1,40E-04
Argilosa	2,56E-04	

Para a obtenção do fator tempo T_v , será considerada a diminuição da distância de drenagem conforme formulação desenvolvida por Martins e Abreu (2002), que é imprescindível para a exatidão dos cálculos em camadas sujeitas a grandes deformações. Os valores de deformação para cada camada são apresentados na tabela 7.30. O valor de recalque primário final é médio, considerando os valores de “r” e os recalques finais adotados. A porcentagem de

recalque de cada tipo de solo foi obtida com base nas contribuições de cada camada calculada em 7.5.1.1.

Tabela 7.30 – Deformação volumétrica por camada (devida ao recalque primário)

Solo	ρ_{pf} (cm)	% ρ_{pf} (cm)	ρ_p (cm)	H_0 (cm)	ϵ_v
Turfoso	170,2	55,4%	94,3	200	47,1%
Argiloso		44,6%	75,9	200	38,0%

A partir da teoria apresentada no capítulo 2, podem ser plotadas as curvas do fator tempo para pequenas deformações (T_v) e dos fatores tempo para as grandes deformações apresentadas acima (T_v^*) (figura 7.24), de onde podem ser tirados os valores de T_v^* correspondentes ao grau de adensamento de 95%, arbitrado como o “fim do adensamento primário”.

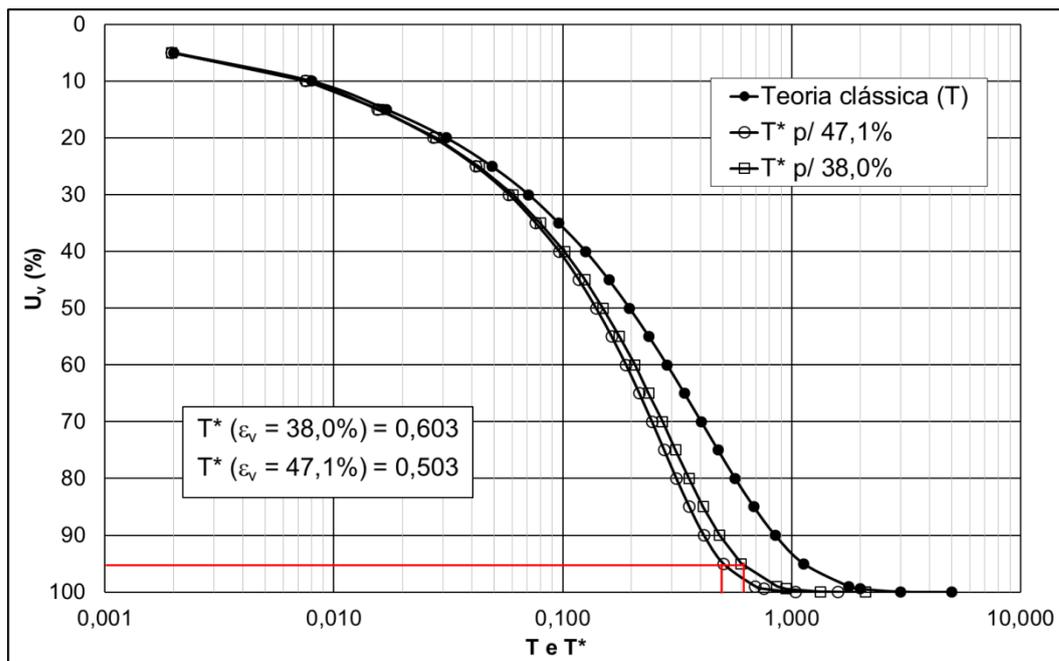


Figura 7.24– Fator tempo modificado, considerando a redução da distância de drenagem

De posse dessas informações podem ser feitos os cálculos de tempo para as duas hipóteses de trabalho apresentadas anteriormente.

Hipótese 1: interface impermeável entre as camadas

Nesta situação, cada subcamada drena independentemente da outra, e o tempo necessário para que seja atingido os T_v^* obtidos anteriormente será dado pela fórmula a seguir:

$$t = \frac{T_v^* \cdot H_d^2}{c_v}$$

A partir da fórmula, pode-se montar a tabela 7.31:

Tabela 7.31 – Tempos para adensamento primário pela hipótese 1

Subcamada	T_v^*	H_d (cm)	c_v (cm ² /s)	t (anos)
Turfoso	0,503	200	5,63E-06	113,3
			1,40E-04	4,6
Argiloso	0,603	200	2,56E-04	3,0
			1,40E-04	5,5

Logo, para a presente hipótese, mesmo com o partido da diminuição da distância de drenagem com o desenvolvimento dos recalques, quando se considera o coeficiente de adensamento obtido em laboratório para o solo turfoso, o tempo necessário para a dissipação de 95% dos excessos de poropressão gerados com o lançamento do aterro ultrapassa 100 anos. Nessa situação a camada argilosa terminaria seu processo de adensamento primário, avançaria no adensamento secundário enquanto a camada superior ainda estaria dissipando excessos de poropressão.

Quando são considerados os coeficientes de adensamento obtidos de ensaios no campo, onde não se percebeu diferença entre os valores por camada, os tempos de adensamento são consideravelmente mais baixos.

Hipótese 2: camada argilosa drena até $U = 95\%$

Nesta situação a camada inferior dissipa poropressões com drenagem simples pela base até atingir $U = 95\%$. A partir daí se torna camada drenante para a camada superior, que passa a dissipar poropressões com drenagem dupla.

A mesma equação do item anterior será usada para montar a tabela 7.32 abaixo.

Tabela 7.32 – Tempos para adensamento primário pela hipótese 2

Subcamada	T_v^*	H_d (cm)	c_v (cm ² /s)	t (anos)
Turfoso	0,503	100	5,63E-06	28,3
			1,40E-04	1,1
Argiloso	0,603	200	2,56E-04	3,0
			1,40E-04	5,5

Nessa situação, os tempos para a dissipação dos excessos de poropressão para a camada argilosa são os mesmos da hipótese anterior, porém os da camada turfosa diminuiram consideravelmente. Deve-se atentar para o fato de que a camada turfosa, na pior condição, só atingirá $U = 95\%$ após 33,8 anos, já que só começa a drenar após a camada inferior atingir esse grau de dissipação (somando os tempos).

Embora o tempo para a dissipação das poropressões da camada como um todo tenha diminuído, ainda deve transcorrer um período bastante longo e impraticável de ser atingido durante qualquer fase de obra.

Os cálculos aqui realizados são simplificados, pois, conforme já mencionado, não se pode ter certeza sobre a real condição de drenagem na interface entre as duas camadas. Porém, parece bastante razoável assumir que as condições extremas foram consideradas aqui, ou seja, a camada como um todo dissipará os excessos de poropressão em um intervalo de tempo entre 4 e 113 anos. Apesar de ser uma faixa extremamente ampla, poucas ferramentas existem que permitam resolver o problema do adensamento em dupla camada sem o emprego de análises numéricas.

Cabe aqui chamar a atenção para outro aspecto. Caso se esteja na condição mais desfavorável de coeficientes de adensamento e com isso a camada turfosa leve, de fato, 113 anos para concluir seu processo de adensamento primário, os 94 cm de recalque primário dessa camada (indicado na tabela 7.30) só se desenvolveriam completamente após esse intervalo de tempo. Em 18 anos, que é o tempo transcorrido desde o lançamento do aterro, o T_v^* seria de apenas 0,08, que corresponde a um grau de adensamento $U = 35\%$. Com isso somente 32,9 cm teria ocorrido, restando 61 cm a se desenvolverem ainda.

Como o recalque final estimado no item anterior ficou entre 212 cm e 225 cm, mesmo que todo o recalque secundário das duas camadas já tivesse se desenvolvido, o que parece pouco plausível, o recalque atual deveria estar entre 151 cm e 164 cm. Como o recalque atual foi assumido como sendo 175 cm, isso descartaria o fato de que os coeficientes de adensamento sejam tão baixos quanto sugerido pelos ensaios de laboratório.

Por fim, cumpre lembrar que as contas aqui efetuadas são um exercício meramente especulativo, até porque, como explicado no item anterior, há grande incerteza nos valores de recalque final estimado, no valor do recalque atual e principalmente nos valores de coeficiente de adensamento.

7.6.2

Estabilização dos recalques

Esse provavelmente é o principal questionamento lançado quando se lida com obras de aterro sobre solos moles: prazo para a estabilização dos recalques. Fora toda a incerteza embutida na determinação dos parâmetros e na dúvida relativa às exatas condições de drenagem das camadas, há também que se considerar a influência do efeito secundário, sobre o qual ainda não existe consenso nem com relação à magnitude nem tampouco com relação à sua evolução no tempo. Por essa razão a teoria do adensamento de Terzaghi não pode ser usada para esse cálculo.

Apesar dessas limitações, será feita aqui uma especulação sobre o tempo necessário para que seja atingido o fim dos recalques no aterro em estudo, considerando a magnitude calculada no item 7.5.3.

7.6.2.1

A partir da velocidade de recalques atual

Fazendo uma conta direta com a velocidade de recalque atual calculada no item 7.4.4 e com o recalque ainda por ocorrer calculado no item 7.5.3 pode-se montar a tabela 7.33.

Tabela 7.33 – Estimativa para o tempo até o fim dos recalques

ρ_{final} (cm)	vel. (mm/ano)	Δt
37	17,3	21,4 anos
50		28,9 anos

Assumir que a velocidade de recalques é constante implica em assumir que o coeficiente de compressão secundária (C_{α}) é constante. Entretanto, conforme apontaram Martins e Lacerda (1989), no limite isso levaria a um índice de vazios negativo, condição impossível de ser atingida. Para que isso aconteça, C_{α} – e consequentemente a velocidade de recalques – deve diminuir com o tempo. Por esse motivo o tempo aqui calculado serve apenas como referência mínima, pois com a diminuição da velocidade o tempo para que a mesma magnitude de recalque seja alcançada será maior.

7.6.2.2

Através da equação logarítmica ajustada às medições de recalque

Novamente, a título de conjectura, será feita uma conta direta para se estimar o tempo necessário para a estabilização dos recalques. Aqui, será empregada a equação logarítmica ajustada às medições de recalque obtidas no presente trabalho. A equação de ajuste ($\rho = 15,995 \cdot \ln t - 78,668$) foi apresentada

no item 7.5.1.3, e o procedimento consiste em substituir no 1º membro o valor de recalque ainda a ocorrer (somado ao recalque observado no início das medições recentes), calculado no item 7.5.3. Os resultados são mostrados na tabela 7.34.

Tabela 7.34 – Estimativa para o tempo até o fim dos recalques

ρ_{final} (cm)	Δt
37	175 anos
50	394 anos

Como era de se esperar, o tempo aqui calculado é maior do que o obtido no subitem anterior, pois a equação logarítmica consegue captar a lenta redução na velocidade dos recalques, o que não ocorre no caso anterior, onde a equação é linear.

Mesmo que esse valor seja mais próximo da realidade ainda não pode ser tomado como correto, pois conforme novos pontos de recalque sejam obtidos acredita-se que a equação logarítmica irá mudar suas constantes, sempre aumentando o tempo calculado em relação à equação obtida com o conjunto de pontos anterior.

7.6.2.3

Pela desaceleração da velocidade de deformação

Aqui não se pretende calcular o tempo para a estabilização dos recalques, mas apenas indicar valores de referência da velocidade de deformação existente no aterro em estudo.

A velocidade de deformação atual é dada por:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\Delta H}{H} \cdot \frac{1}{\Delta t} \quad (5.1)$$

Para os pontos monitorados com o nivelamento geométrico de precisão no Local 1 tem-se a tabela 7.35.

Tabela 7.35 – Velocidades de deformação e velocidades de recalque correntes

Ponto	ΔH (mm)	H (mm)	Δt (dias)	vel. def. (s^{-1})	vel. recalque (mm/ano)
M0	28,4	2000	599	2,9E-10	17,3
M1	24,5	2000	599	2,5E-10	14,9
M2	17,2	2000	599	1,7E-10	10,5

Meramente a título de comparação, para que a magnitude de recalque em um ano fosse exatamente igual à precisão do processo de medição descrito no capítulo 6 ($\pm 0,300$ mm) a velocidade de deformação deveria ser de:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\Delta H}{H} \cdot \frac{1}{\Delta t} = \frac{0,3}{2000} \cdot \frac{1}{365 \cdot 86400} = 4,8 \cdot 10^{-12} s^{-1}$$

Logo, supondo que o recalque se desenvolva por tempo infinito ou, pelo menos, por um período bastante grande (séculos ou milênios), um possível critério para definição do “fim prático” dos recalques seria um que considerasse que em \underline{x} anos o recalque fosse de \underline{y} mm. Seria calculado então o prazo para que a velocidade de deformação chegasse até ali. A tabela 7.17 mostrou valores de velocidade correntes para diferentes casos de medição de longo prazo.

7.6.3

Considerações sobre o adensamento

Observando a curva completa de recalques mostrada na figura 7.13, é interessante comentar um aspecto levantado por Sousa Pinto (2001), que identificou quatro trechos distintos em uma curva recalque-tempo típica, a saber:

- 1) Trecho referente ao início do adensamento primário, que pode ser expresso por uma equação parabólica;

- 2) Trecho ainda referente ao adensamento primário, que é caracterizado por uma equação exponencial;
- 3) Trecho de transição entre o adensamento primário e secundário, durante o qual os dois processos estão em desenvolvimento; e
- 4) Trecho final que reflete o adensamento secundário e que pode ser representado por uma equação logarítmica.

Na opinião do autor, o caso em estudo encontra-se hoje no trecho 4 (secundário “puro”) ou, ao menos, no trecho 3. Em ambos os casos, a teoria clássica do adensamento não vale e, por consequência, o coeficiente de adensamento obtido para a fase inicial não se presta para realizar previsões sobre a evolução do recalque no campo em longo prazo.

Da mesma forma, também não é válido usar as leituras recentes obtidas com o nivelamento geométrico de precisão para extrair informações sobre o comportamento do solo no início do processo de adensamento. Por outro lado, parece bastante razoável usar essas mesmas leituras para prever o comportamento futuro do solo ainda em compressão.

7.7

Considerações finais

Foi apresentada no presente capítulo uma análise de todas as informações levantadas sobre o caso do aterro de Terra Encantada. Procurou-se deixar claro que, mesmo com variedade de dados disponíveis, as incertezas são grandes e prejudicam sobremaneira a obtenção de respostas mais conclusivas sobre o comportamento do solo em estudo. Apesar disso, o presente caso é, possivelmente, o que há de mais completo em medições dessa natureza no país, podendo se prestar a trabalhos semelhantes em aterros já existentes ou ainda por serem implantados. Tudo com o objetivo de ampliar a compreensão do fenômeno do adensamento secundário em campo.

Por fim, o autor acredita que a única maneira de avançar nesse sentido é a partir de um banco de dados extenso com casos de medição continuada por longo prazo em aterros sobre solos compressíveis na maior variedade possível de locais.