

4 Análise dos Resultados

4.1 Ensaio de Laboratório e Campo

4.1.1 Ensaio de Caracterização

O Apêndice 1 apresenta fotografias de porções de solo retiradas de cada tubo *Shelby*. Todas as amostras apresentaram coloração variando entre tons de marrom, cinza, e preto.

Os resultados dos ensaios de caracterização estão apresentados na Tabela 4.1. Chama-se atenção para os elevados teores de umidade e de matéria orgânica das amostras 2 e 6, principalmente. A amostra 2 apresentou, inclusive, teor de umidade acima do limite de liquidez. Em concordância com estes resultados, vê-se que as duas apresentam valores de densidade relativa dos grãos (G_s) mais baixos que os demais, característicos de materiais orgânicos.

Com exceção da amostra 1, as outras amostras também apresentaram teores elevados de material orgânico, variando entre 23 e 28%, aproximadamente.

Tabela 4.1 – Resultados dos ensaios de caracterização

Am.	Prof. méd. (m)	ω (%)	LL (%)	LP (%)	γ_N (kN/m ³)	G_s	Granulometria (%)			TMO (%)
							Areia	Silte	Argila	
1	2,90	105,1	187,4	70,2	14,25	2,59	50,8	34,9	14,4	8,43
5	3,55	216,8	216,2	110,3	11,02	2,38	39,6	39,9	20,5	38,85
2	4,20	507,0	382,0	NP*	10,24	1,47	41,1	43,9	15,0	78,79
3	5,80	190,4	276,0	158,5	12,17	2,33	65,1	24,3	10,6	23,66
4	6,80	288,4	296,5	210,8	11,13	2,19	36,3	51,7	12,0	25,66
6	7,80	377,5	288,1	201,3	11,90	1,71	25,7	41,4	32,9	79,36
7	8,80	322,4	291,2	219,5	11,13	2,15	24,5	54,6	20,9	28,63
8	9,80	202,8	238,5	127,9	11,73	2,16	53,4	35,8	10,8	27,03

*NP: não plástico

A Figura 4.1 mostra os perfis de umidade e limites de consistência encontrados, juntamente com o perfil de matéria orgânica.

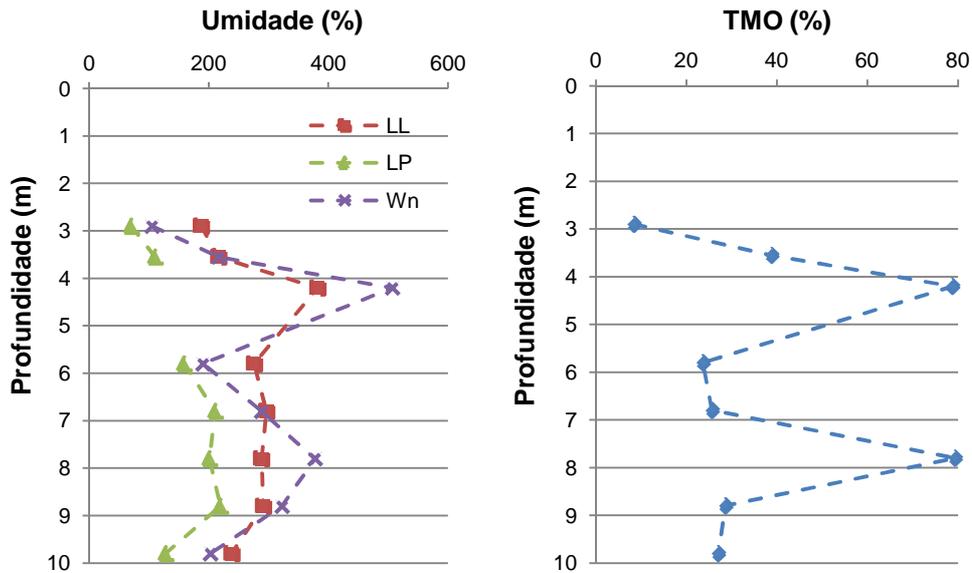


Figura 4.1 – Variação da umidade, limites de consistência e teor de matéria orgânica

Com relação à granulometria, observa-se uma grande variabilidade de frações componentes das amostras, sendo que algumas apresentam, inclusive, predominância da fração arenosa, cujos grãos (quartzo, em geral) têm densidades (G_s) maiores que a matéria orgânica.

Teixeira (2012) apresentou resultados semelhantes, indicando porcentagens de areia superiores a 50%. Este aspecto será discutido adiante, novamente, com os resultados dos ensaios de piezocone.

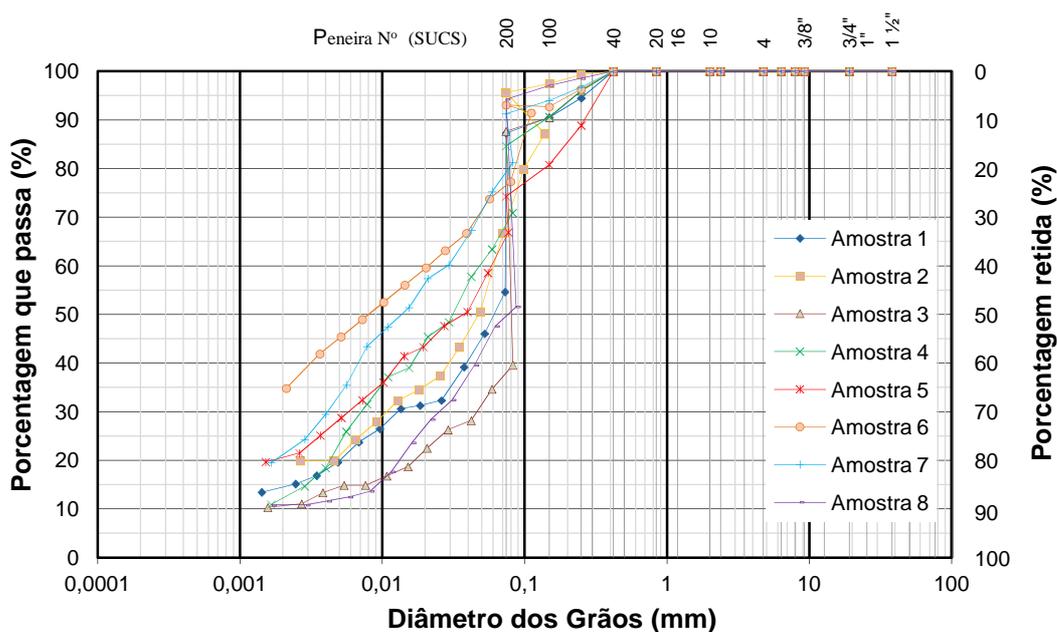


Figura 4.2 – Curvas granulométricas das amostras

4.1.2 Ensaio de Piezocone e Dissipação

Os ensaios de piezocone permitiram definir a estratigrafia atual do depósito, determinando-se a espessura da camada mole, de aproximadamente 10 m.

Os perfis de resistência de ponta corrigida (q_t), atrito lateral (f_s), excesso de poropressão (u) e índice B_q dos ensaios de piezocone, bem como as curvas dos ensaios de dissipação estão apresentados nos Anexos 2 e 3, respectivamente.

Nos gráficos de q_t , observaram-se picos de resistência de ponta em três profundidades (aproximadas): 1,5 m, 5,0 m e 10,5 m. A última delas (10,5 m) corresponde à camada arenosa sobre a qual se encontra o depósito de solo mole. As duas primeiras (1,5 e 5,0 m) são, possivelmente, finas camadas de solo arenoso, comumente denominadas “lentes de areia”, que, por processos cíclicos de avanço e recuo do mar, ali se depositaram. O autor não acredita que estes picos sejam devidos à presença de galhos ou conchas, pois o gráfico de u indicou excessos de poropressão nulos ocorrendo nestas profundidades, ou seja, aparentemente trata-se de camadas drenantes.

Observa-se que as resistências de ponta do solo mole estão compreendidas entre 200 e 400 kPa. Estes valores são usuais para solos moles, e são semelhantes aos resultados apresentados por Rocha Filho (1988) e Jannuzzi (2009), para as argilas de Sarapuí, e por Baroni (2010) e Teixeira (2012), para depósitos da Barra da Tijuca.

Os gráficos do parâmetro de poropressão B_q em função da profundidade mostraram valores de até 0,7, aproximadamente, indicando baixa sensibilidade dos solos. A Figura 4.3 mostra, também, os gráficos $B_q \times Q_t$, cuja análise indica a predominância dos resultados para B_q variando entre 0 e 0,5, e Q_t variando entre 10 e 100. De acordo com a Figura 2.6 e a Tabela 2.3, propostas por Robertson (1990), as amostras situam-se, portanto, nas zonas 4 a 6, indicando materiais silto-argilosos e areias siltosas. Estes resultados justificam as curvas granulométricas apresentadas anteriormente.

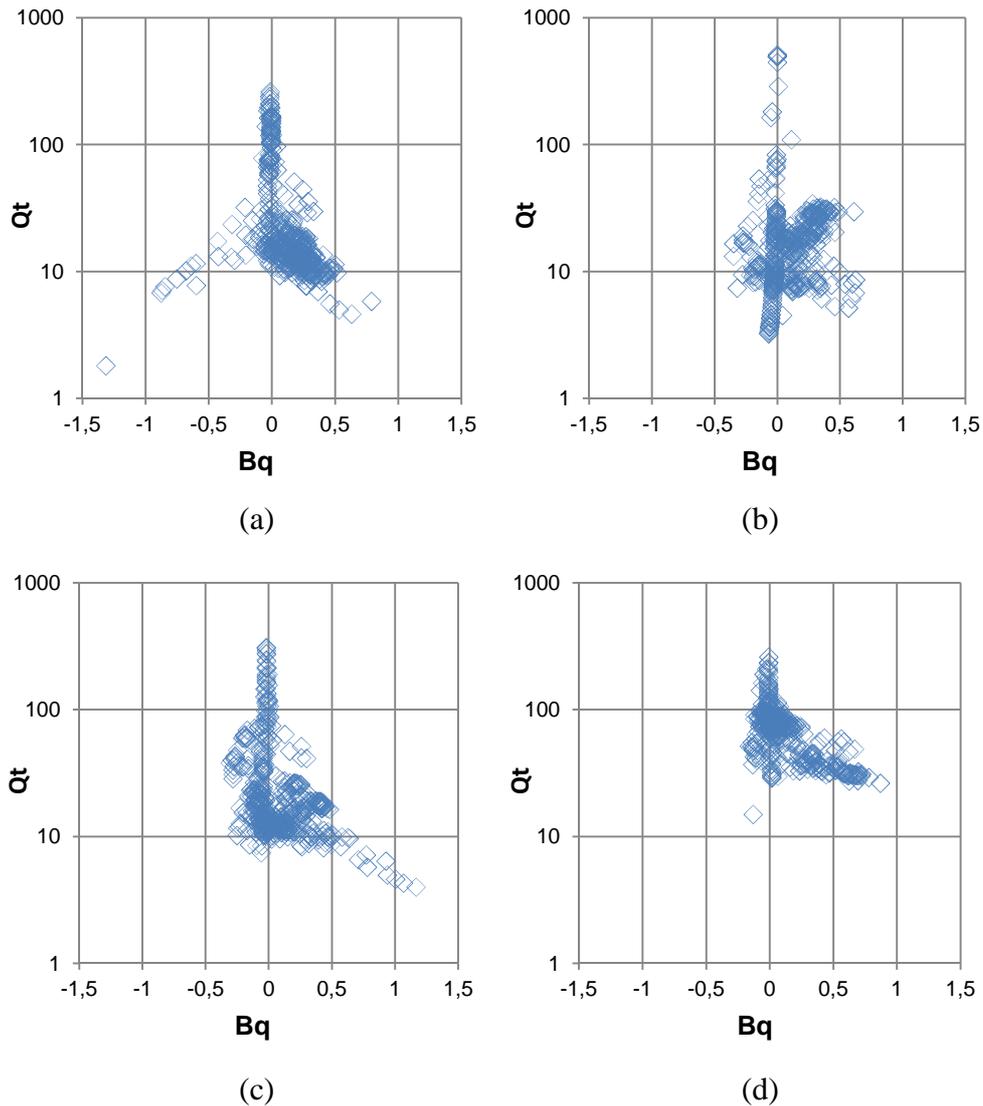


Figura 4.3 – Relação B_q x Q_t para diferentes velocidades de ensaio
 (a) 20 mm/s; (b) 58,4 mm/s; (c) 6 mm/s; (d) 2 mm/s

A obtenção de OCR de campo com ensaios de piezocone, bem como a discussão dos resultados, será apresentada adiante, juntamente com a apresentação dos resultados dos ensaios de adensamento.

Com os resultados dos ensaios de dissipação, calcularam-se valores para o coeficiente de adensamento horizontal e vertical de campo, de acordo com o procedimento proposto por Houlsby e Teh (1988), resumidos na Tabela 4.2. Para a relação entre as permeabilidades horizontal (k_h) e vertical (k_v), considerou-se o valor de 1,5 (Jamiolkowski *et al.*, 1985).

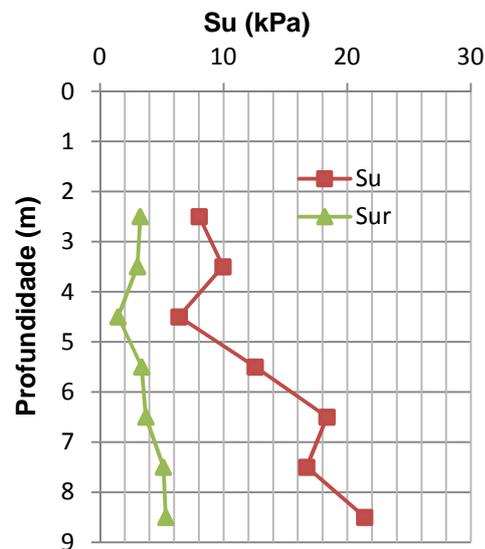
Tabela 4.2 – Coeficientes de adensamento do ensaio de dissipação

Prof. (m)	Coeficiente de Adensamento ($\times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}$)	
	c_h (NA)	c_v (NA)
3,50	5,07	3,38
4,50	7,96	5,31
5,50	15,60	10,40
6,80	7,91	5,27
Média:	9,14	6,09

As discussões acerca do valor de c_v obtido nos ensaios de dissipação serão apresentadas quando forem discutidos os valores encontrados nos ensaios de adensamento.

4.1.3 Ensaio de Palheta

Os gráficos dos ensaios de palheta estão apresentados no Apêndice 4. Os valores das resistências não drenadas do solo mole ao longo da profundidade são apresentados na Figura 4.4. Estes valores foram corrigidos pelo fator de Bjerrum (1973) e estão apresentados nas condições indeformada (s_u) e amolgada (ou residual, s_{ur}).

Figura 4.4 – Perfis de s_u nas condições indeformada e amolgada

Dividindo-se o valor de s_u por s_{ur} , obtém-se a sensibilidade (S_t) do material:

$$S_t = \frac{S_u}{S_{ur}} \quad (4.1)$$

A Tabela 4.3 apresenta os valores de sensibilidade encontrados para as diferentes profundidades ensaiadas. Confirmando os resultados dos ensaios de piezocone (B_q), o solo apresenta baixa sensibilidade.

Tabela 4.3 – Sensibilidade do solo

Prof. (m)	s_u campo (kPa)	s_{ur} campo(kPa)	S_t
2,5	8,03	3,26	2,5
3,5	9,95	3,04	3,3
4,5	6,40	1,46	4,4
5,5	12,55	3,37	3,7
6,5	18,37	3,71	4,9
7,5	16,72	5,13	3,3
8,5	21,41	5,33	4,0

4.1.4 Ensaio de Adensamento

Os ensaios de adensamento realizados transcorreram, de maneira geral, sem muitos problemas. A moldagem dos corpos de prova foi ligeiramente atrapalhada pela presença de matéria orgânica, que desestruturava o solo, quando da cravação do anel de moldagem na amostra.

Apresentam-se, a seguir, os resultados obtidos.

- **Coefficiente de adensamento vertical**

A obtenção do coeficiente de adensamento (c_v) das amostras foi realizada pelos métodos de Casagrande e de Taylor, para cada estágio de carregamento. Como é comum ocorrer nestes ensaios, não foi possível determinar os valores de c_v em todas as etapas, devido à forma das curvas geradas, inadequadas à aplicação dos métodos. Este fato aconteceu, principalmente, nas etapas de carregamentos iniciais, de menores magnitudes. As curvas de c_v em função da tensão vertical efetiva estão apresentadas no Apêndice 5.

Para a definição de um valor de c_v único para o depósito, adotou-se o seguinte critério:

- Determinaram-se os valores de c_v pelos métodos de Casagrande e Taylor, para os carregamentos referentes às tensões de 40 e 80 kPa,

dos ensaios de adensamento convencionais. Considerou-se a média destas tensões (60 kPa) como a média de tensões atuantes no perfil geotécnico;

- b) O c_v do depósito foi determinado como a média dos valores encontrados pelo método de Casagrande, para as tensões citadas acima, resultando no valor de $1,51 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}$. O método de Taylor apresentou valor médio de c_v de $5,13 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}$.

Comparando-se os valores de c_v encontrados por Carvalho (1980) com os valores obtidos nos ensaios de dissipação em piezocone e de adensamento, observa-se que há uma semelhança nos valores (variação entre 1×10^{-3} e $5 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}$, aproximadamente).

Sandroni *et al.* (1981) apresentaram valores de c_v deste mesmo depósito, determinados de diferentes maneiras, resumidos na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Coeficientes de adensamento vertical (Sandroni *et al.*, 1981)

Método	$c_v \text{ (cm}^2/\text{s)}$	$(c_v)_u/c_v$
Ensaio de adensamento (mét. raiz de t)	5×10^{-3}	125
" m_v " de laboratório mais " k " <i>in situ</i>	6×10^{-2}	10
Placas de recalque (mét. do log t)	4×10^{-1}	1,6
Placas de recalque (mét. da raiz de t)	5×10^{-1}	1,3
Piezômetros - $(c_v)_u$	6×10^{-1}	1

A discussão destes valores será apresentada no item 4.3.

- **Parâmetros de compressibilidade e qualidade das amostras**

A Tabela 4.5 apresenta alguns dados obtidos nos ensaios de adensamento, como os parâmetros de compressibilidade (C_c e C_r), e a relação ($\Delta e/e_o$), proposta por Lunne *et al.* (1997), para avaliação da qualidade das amostras. Os critérios de Lunne *et al.* (1997) e de Coutinho *et al.* (1998) foram utilizados para tal avaliação.

Tabela 4.5 – Alguns parâmetros obtidos nos ensaios de adensamento

Amostra	$\frac{C_c}{1 + e_0}$	$\frac{C_s}{1 + e_0}$	Qualidade das Amostras			Material do tubo Shelby
			$\frac{\Delta e}{e_0}$	Lunne <i>et al.</i> (1997)	Coutinho <i>et al.</i> (1998)	
1	0,44	0,07	0,111	Pobre	Pobre	Aço inox.
2	0,52	0,06	0,071	Regular a pobre	Regular a pobre	Ferro
3	0,49	0,08	0,070	Regular a pobre	Regular a pobre	Ferro
4	0,52	0,06	0,062	Boa a regular	Regular a pobre	Aço inox.
5	0,35	0,04	0,078	Regular a pobre	Regular a pobre	Aço inox.
6	0,34	0,03	0,135	Pobre	Muito pobre	Ferro
7	0,49	0,07	0,123	Pobre	Muito pobre	Aço inox.
8	0,47	0,08	0,121	Pobre	Muito pobre	Ferro

Analisando-se os valores segundo estes critérios, observa-se que as amostras sofreram amolgamento significativo, apesar de os trechos virgens das curvas de compressibilidade de todas as amostras (com exceção da amostra 6) não terem se apresentado retilíneos, o que, segundo Martins e Lacerda (1994), indica boa qualidade das amostras.

Este amolgamento, na opinião do autor, é resultado de dois fatores principais: a característica da ponta de cravação dos tubos *Shelby* utilizados na amostragem (valores de folga interna, C_i , elevados), discutido no item 3.1.3, e a perda de umidade das amostras no laboratório.

Outro fator que pode ter influenciado o amolgamento foi a oxidação interna observada nos tubos de ferro: a Figura 4.5 mostra uma porção de um dos tubos amostradores, cujo material oxidado foi raspado.



Figura 4.5 – Oxidação interna do tubo

- **OCR de laboratório e campo**

A tensão de sobreadensamento foi obtida pelos métodos de Casagrande (1936), Pacheco Silva (1970) e Sridharan *et al.* (1991). A Tabela 4.6 apresenta os resultados. Com exceção das amostras 1 e 4, observa-se que o método de Sridharan *et al.* (1991) obteve os maiores valores de σ'_p ,

Calcularam-se dois OCR diferentes: com a média aritmética dos valores de σ'_p obtidos pelos três métodos, e com o valor máximo de σ'_p . A justificativa é que os valores de OCR, devido ao amolgamento das amostras, estão subestimados (certamente estão no caso das amostras 6, 7 e 8, pois OCR, por definição, não pode ser menor que 1).

Tabela 4.6 – Tensões de pré-adensamento (σ'_p) e OCR obtidos por diferentes métodos

Amostra	σ'_p (kPa)			OCR* (σ'_p méd.)	OCR** (σ'_p máx.)
	Casagrande (1936)	Pacheco Silva (1970)	Sridharan <i>et al.</i> (1991)		
1	26,5	25,3	25,9	1,04	1,07
2	41,1	38,4	48,0	1,55	1,75
3	39,8	37,3	41,5	1,16	1,21
4	52,9	53,5	51,8	1,38	1,40
5	44,5	39,0	51,7	1,73	1,98
6	31,0	29,8	33,4	0,77	0,79
7	36,3	37,7	44,5	0,85	0,96
8	38,7	46,1	52,0	0,94	1,04

*Obtido pela média das tensões de sobreadensamento

**Obtido pela máxima das tensões de sobreadensamento

Outros dois métodos, baseados em correlações empíricas com resultados de ensaios de campo, foram utilizados para a determinação da razão de sobreadensamento (OCR), a título de comparação de valores.

O primeiro deles utiliza as correlações empíricas de Chen e Mayne (1996), corrigidas por Jannuzi (2009) e Baroni (2010). Como as poropressões geradas foram monitoradas somente na base do cone (u_2), não sendo monitoradas na ponta de cravação (u_1), somente as Equações 2.8 e 2.9 foram utilizadas.

A Figura 4.6 mostra o perfil de OCR obtido com os ensaios de piezocone (velocidade de cravação normal - 20 mm/s) e de adensamento convencionais, utilizando as Equações 2.8 e 2.9 (Figura 4.6a e 4.6b, respectivamente). Da mesma

forma, as Figuras 4.7, 4.8 e 4.9 apresentam estes perfis, para as velocidades de cravação de 58,4 mm/s (rápida), 6,0 mm/s (lenta) e 2,0 mm/s (muito lenta), respectivamente.

Os valores de K_1 e K_2 utilizados foram de 0,15 e 0,265, respectivamente.

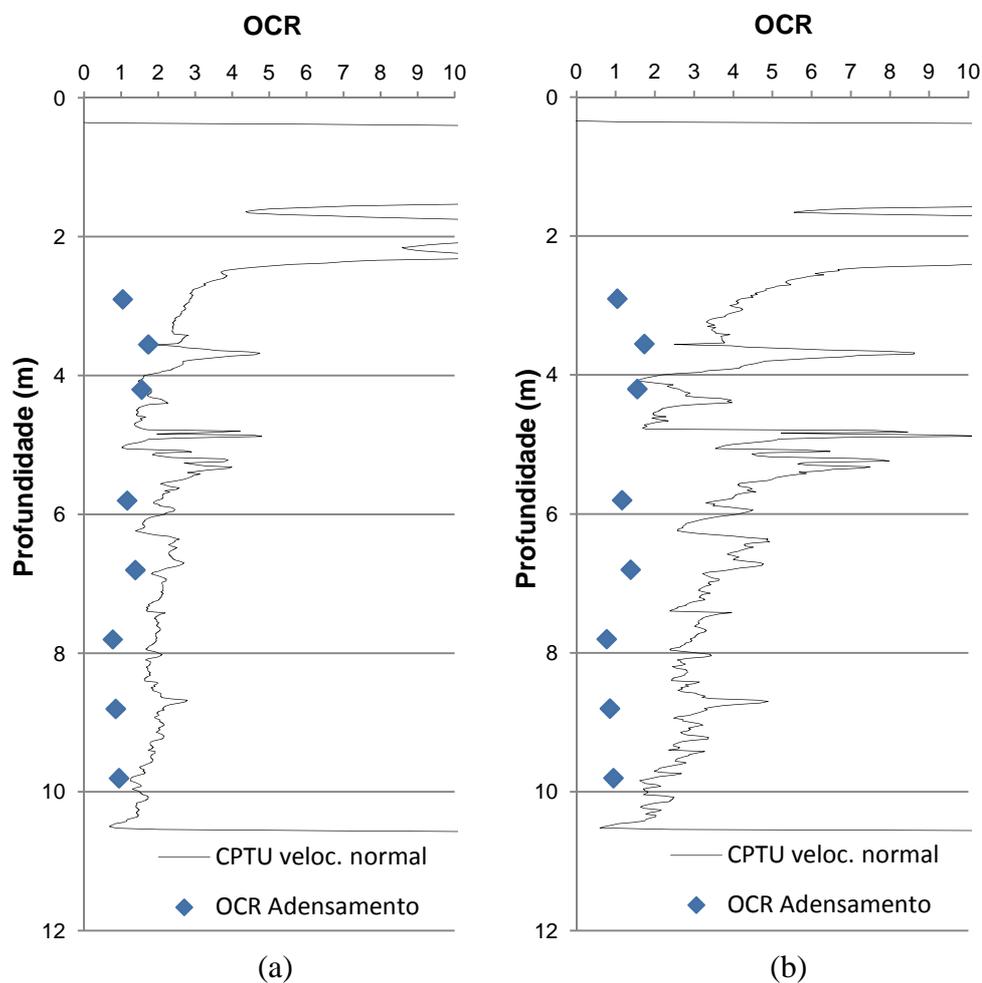


Figura 4.6 – Perfis de OCR - Velocidade de cravação normal (20 mm/s)

(a) $OCR = 0,15 \left(\frac{q_t - \sigma_{vo}}{\sigma'_{vo}} \right)$ (Jannuzzi, 2009);

(b) $OCR = 0,265 \left(\frac{q_t - u_2}{\sigma'_{vo}} \right)$ (Baroni, 2010)

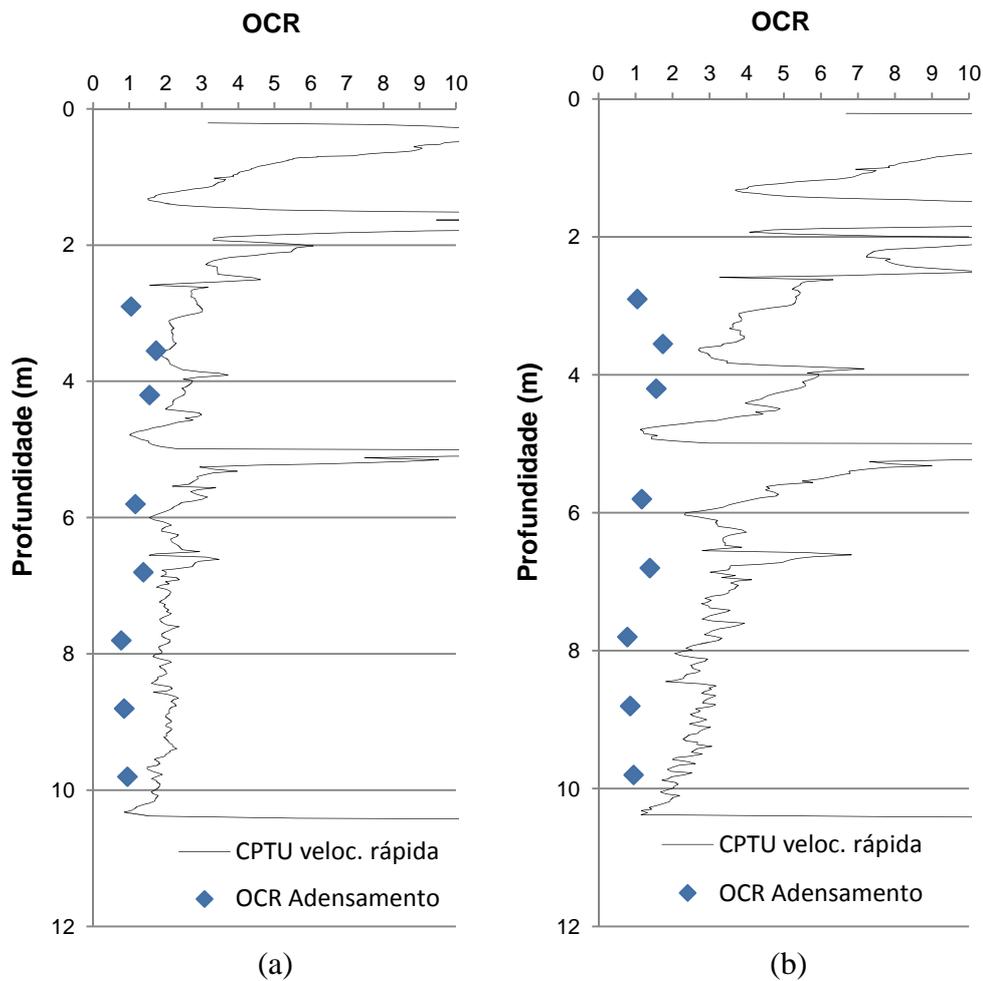


Figura 4.7 – Perfis de OCR - Velocidade de cravação rápida (58,4 mm/s)

(a) $OCR = 0,15 \left(\frac{q_t - \sigma_{vo}}{\sigma'_{vo}} \right)$ (Jannuzzi, 2009);

(b) $OCR = 0,265 \left(\frac{q_t - u_2}{\sigma'_{vo}} \right)$ (Baroni, 2010)

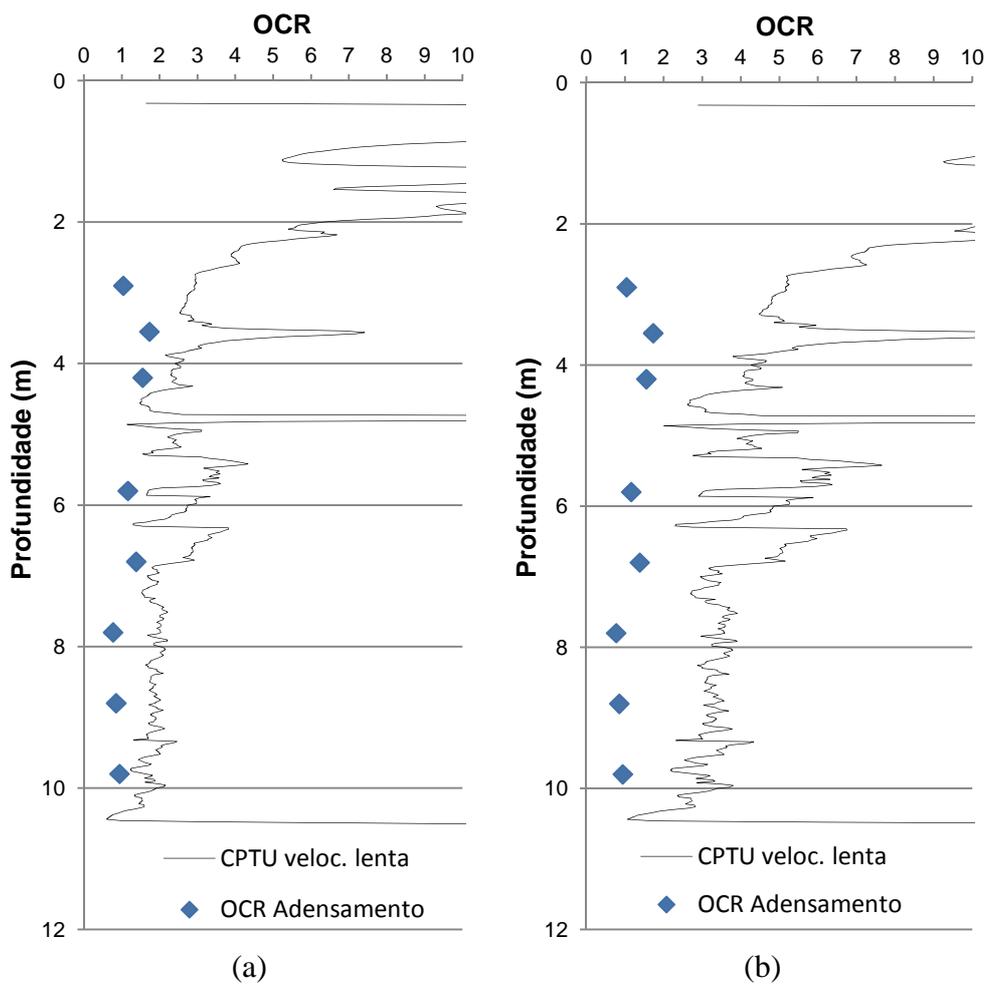


Figura 4.8 – Perfis de OCR - Velocidade de cravação lenta (6,0 mm/s)

(a) $OCR = 0,15 \left(\frac{q_t - \sigma_{vo}}{\sigma'_{vo}} \right)$ (Jannuzzi, 2009);

(b) $OCR = 0,265 \left(\frac{q_t - u_2}{\sigma'_{vo}} \right)$ (Baroni, 2010)

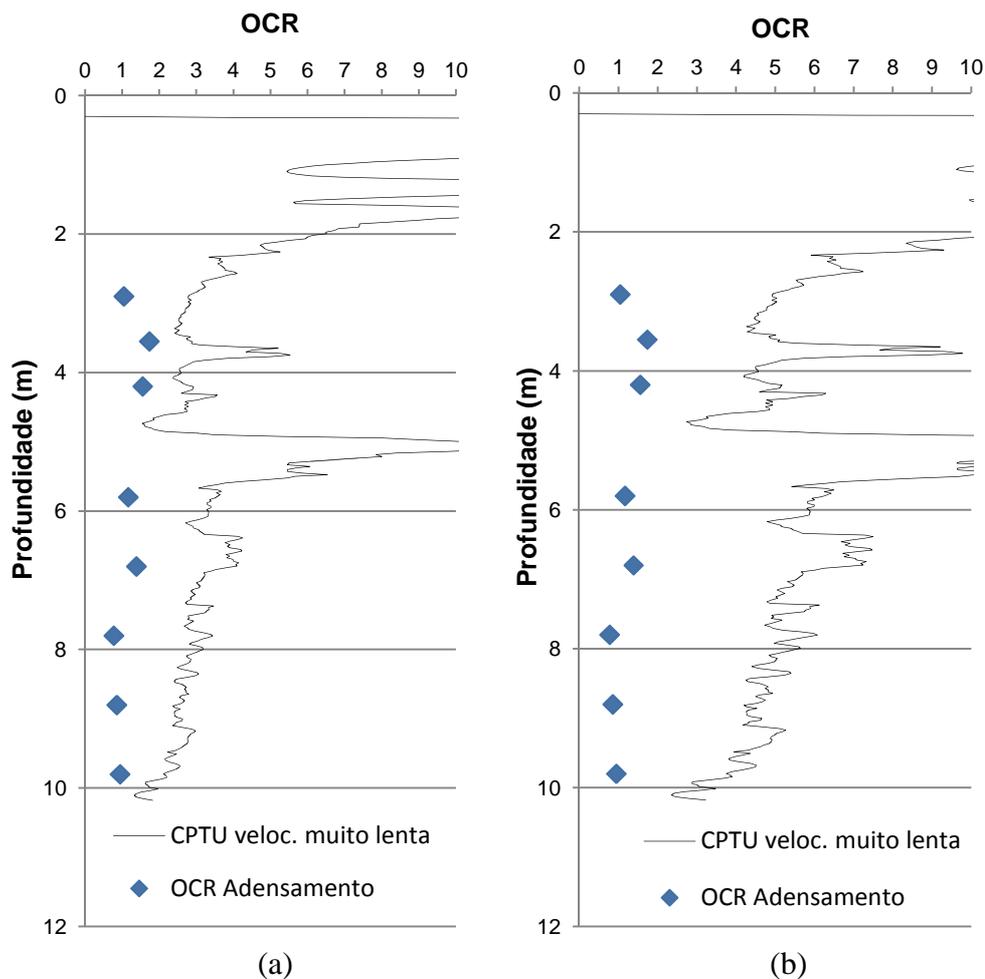


Figura 4.9 – Perfis de OCR - Velocidade de cravação muito lenta (2,0 mm/s)

(a) $OCR = 0,15 \left(\frac{q_t - \sigma_{vo}}{\sigma'_{vo}} \right)$ (Jannuzzi, 2009);

(b) $OCR = 0,265 \left(\frac{q_t - u_2}{\sigma'_{vo}} \right)$ (Baroni, 2010)

Nota-se que, para todas as velocidades de ensaio, a proposição de Jannuzzi (2009), cujos valores de OCR situaram-se próximos a 2, apresentou maior concordância com os valores obtidos nos ensaios de adensamento, quando comparadas com a proposição de Baroni (2010).

O autor acredita que, apesar de as amostras terem apresentado qualidades insatisfatórias em relação aos critérios de Lunne *et al.* (1997) e Coutinho (1998), os valores de K_1 e K_2 propostos por Jannuzzi (2009) e Baroni (2010) parecem estar superestimados para os solos moles de Camboinhas. Ambas as curvas se ajustam de maneira satisfatória para valores de K_1 e K_2 aproximadamente iguais a

0,08. Considerando-se a baixa qualidade das amostras, sugere-se o valor de 0,10 para estes parâmetros.

O outro método de determinação da tensão de pré-adensamento utiliza a resistência não drenada do solo, obtida no ensaio de palheta e a equação SHANSEP (*Stress History And Normalized Soil Engineering Parameters*), proposta por Ladd (1991).

$$\frac{S_u}{\sigma'_{vo}} = S \left(\frac{\sigma'_p}{\sigma'_{vo}} \right)^m = S (OCR)^m \quad (4.2)$$

Invertendo-se a Equação (4.2), obtém-se:

$$OCR = \sqrt[m]{\frac{S_u}{S \cdot \sigma'_{vo}}} \quad (4.3)$$

Determinaram-se, desta forma, as tensões de sobreadensamento das amostras, apresentadas na Tabela 4.7. Os valores utilizados para m e S foram, respectivamente, 0,8 e 0,25.

Tabela 4.7 – Obtenção de OCR pela equação SHANSEP (Ladd, 1991)

Prof. (m)	OCR (palheta)
2,5	1,85
3,5	2,23
4,5	1,19
5,5	2,19
6,5	2,96
7,5	2,26
8,5	2,69
Média	2,19

Aparentemente, os valores estão superestimados, uma vez que pode ter havido drenagem parcial durante a execução do ensaio.

Entretanto, considerando-se a média (2,19), este resultado assemelha-se ao obtido pela correlação de Jannuzzi (2009) para os ensaios de piezocone.

- **Ensaio de adensamento não convencionais**

Os ensaios de adensamento não convencionais tiveram como objetivo a determinação de valores de C_α/C_c , de amostras carregadas até a tensão vertical efetiva de campo correspondente à profundidade de extração. Atingida esta tensão, a amostra era deixada adensar por períodos que variaram entre 22 e 47 dias.

As Figura 4.10 e Figura 4.11 mostram, respectivamente, os gráficos “recalque x log t” de todas as etapas de carregamento e da última etapa do ensaio AD-1.2. À parte retilínea do gráfico da Figura 4.11, ajustou-se uma reta para a determinação de C_α , de acordo com a equação (4.4):

$$\frac{C_\alpha}{1 + e_o} = \frac{\rho_{t+\Delta t} - \rho_t}{H \log \left(\frac{t + \Delta t}{t} \right)} \quad (4.4)$$

Entretanto, os resultados obtidos para a relação C_α/C_c foram de 7 a 18 vezes superiores aos resultados citados por Mesri e Castro (1987), provavelmente devido ao tempo relativamente curto dos ensaios (Tabela 4.8).

Tabela 4.8 – Resultados dos ensaios de adensamento não convencionais (C_α/C_c)

Amostra	$C_\alpha/1+e_o$ (média)	C_α/C_c	Tempo de ensaio (dias)
1	0,15	0,39	22
2	0,24	0,45	47
3	0,48	0,93	30
4	0,36	0,62	31
5	0,19	0,55	31
6	*	*	*
7	0,35	0,73	47
8	*	*	*

*Carga erroneamente aplicada – resultados desconsiderados

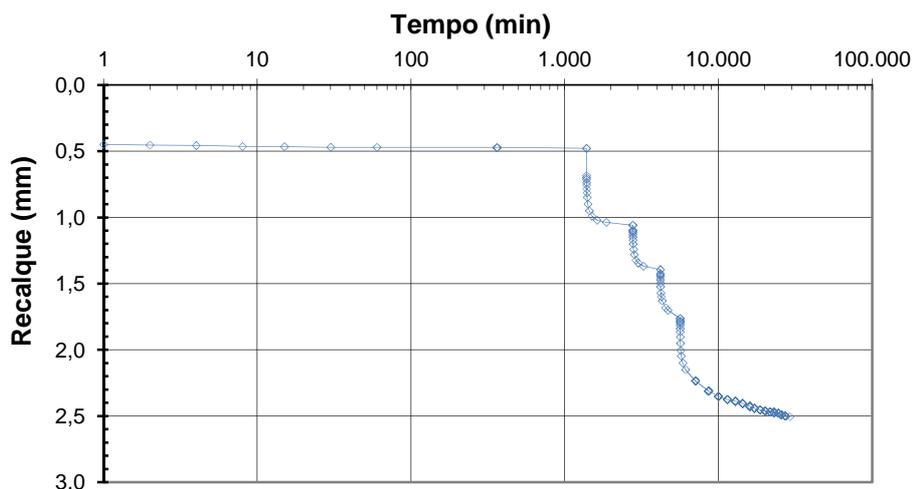


Figura 4.10 – Curva "recalque x log tempo" do ensaio AD-1.2

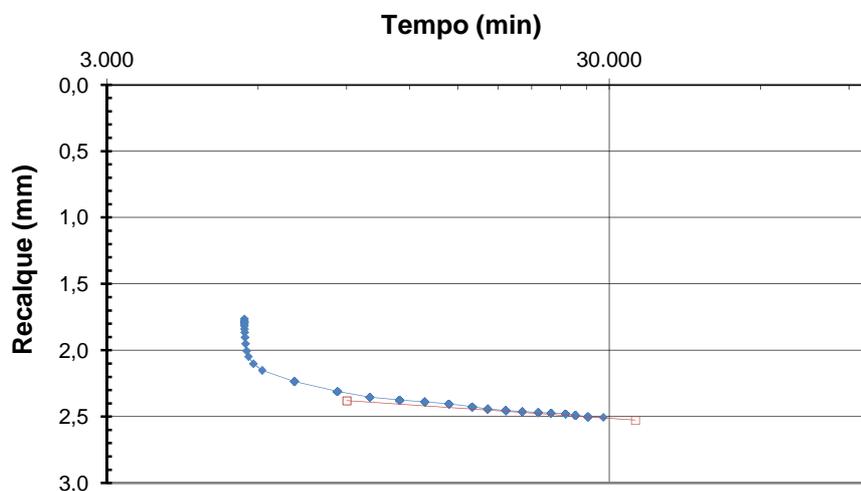


Figura 4.11 – Última etapa de carregamento - escala ampliada

4.2 Medições de Recalque

A Figura 4.12 apresenta as curvas de recalque obtidas em Cambinhas, para os sete pontos monitorados.

A leitura de referência (ou leitura zero) foi feita no dia 13/07/2014 e as leituras subsequentes não foram realizadas em intervalos de tempo iguais.

Observa-se que, aparentemente, os recalques ainda estão ocorrendo. Os valores encontrados situam-se entre cerca de 3 e 7 mm, em um período de leitura de 200 dias (6,7 meses). A velocidade média de recalque (v_m), considerando como 5 mm o valor médio observado, foi de:

$$v_m = \frac{5 \text{ mm}}{6,7 \text{ meses}} \cong \frac{0,75 \text{ mm}}{\text{mês}} \cong \frac{9 \text{ mm}}{\text{ano}}$$

Com o valor do recalque obtido nas leituras ao longo do tempo, calcula-se a velocidade de deformação específica ($\dot{\epsilon}$) do depósito, pela seguinte equação:

$$\dot{\epsilon} = \frac{\Delta H}{H} \frac{1}{\Delta t} \quad (4.5)$$

Onde:

- ΔH : variação da espessura da camada entre o início e o término das medições de recalque ($\Delta H = 5 \text{ mm}$);
- H : espessura da camada de solo mole ($H \cong 10 \text{ m}$);
- Δt : período de tempo correspondente a ΔH observado ($\Delta t = 200 \text{ dias} = 17,28 \times 10^6 \text{ s}$).

Considerando-se os valores acima: $\dot{\epsilon} = 2,89 \times 10^{-11} \text{ s}^{-1}$.

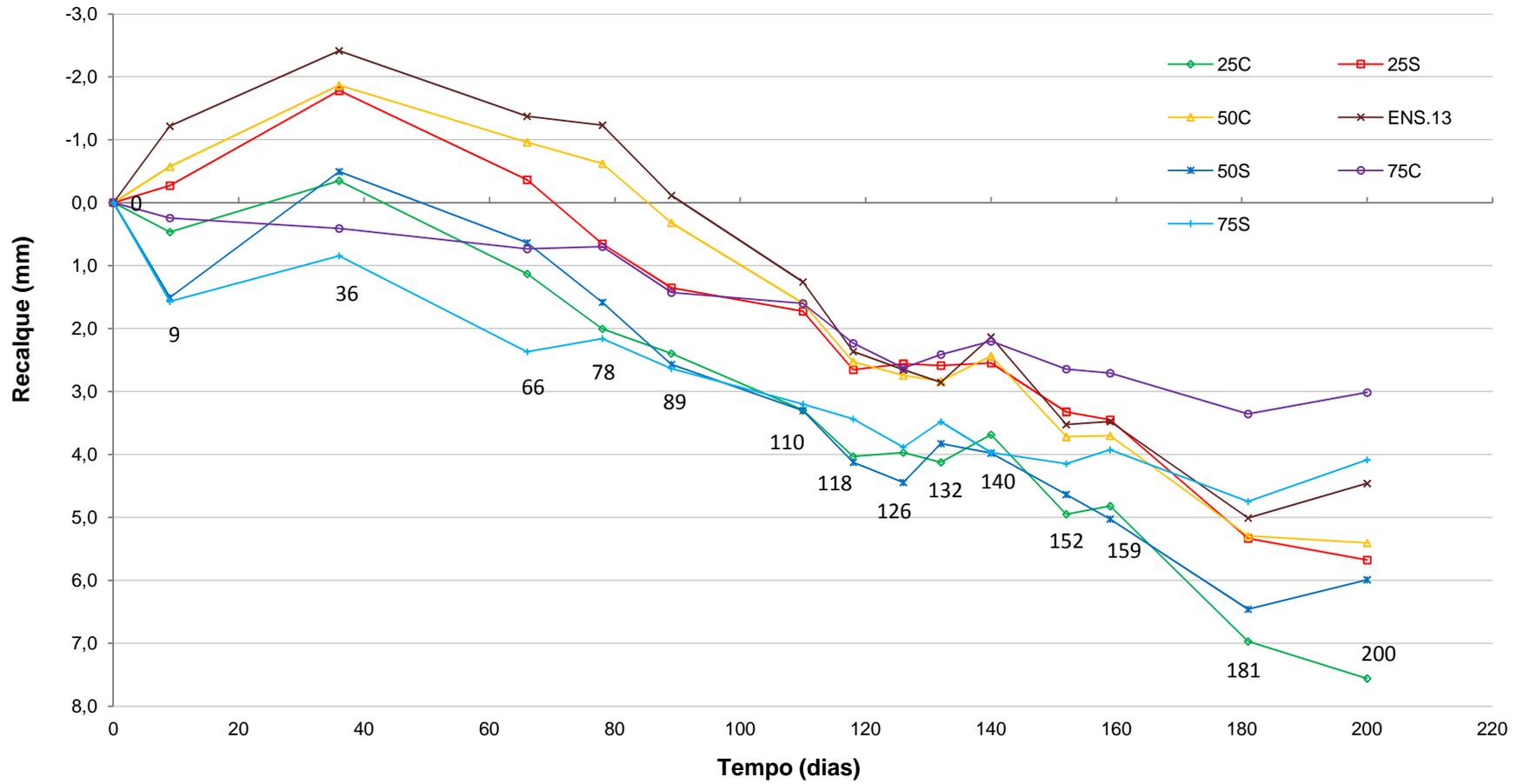


Figura 4.12 – Recalques medidos em Camboinhas

Dúvidas sobre a qualidade das informações obtidas e, conseqüentemente, sobre a efetiva ocorrência de recalques, foram levantadas por dois motivos:

- a) Os erros de cada leitura poderiam influenciar de forma significativa os valores dos recalques, a ponto de não se estar medindo recalque, mas somente o próprio erro inerente ao processo (conforme discutido no item 3.2);
- b) A variação do NA, devido às chuvas, e a conseqüente variação de tensões causada, causaria alguma variação nos recalques.

- **Influência dos erros das leituras**

Com relação à influência dos erros do procedimento de medição, calculou-se o erro médio de cada dia de medição por meio da divisão do erro de fechamento pelos oito lances. Estes valores foram inseridos no gráfico da Figura 4.13. Esta figura mostra a média e o desvio padrão dos erros médios obtidos.

Observa-se que os valores dos erros de fechamento variaram em uma faixa de +0,132 a -0,149 mm, com média (μ) igual a -0,013 mm, e desvio-padrão (σ) de 0,084 mm.

Tassi (2014) pondera que admitir a incerteza (λ) da medição como o valor do módulo da dispersão dos erros (0,149 mm) seria conservador e até mesmo errado, sob o ponto de vista estatístico. Admitiu-se, então, a incerteza como correspondente a somente um desvio-padrão:

$$\lambda = \pm |\mu + \sigma| \quad (4.6)$$

$$\lambda = \pm 0,071 \text{ mm} \quad (4.7)$$

A incerteza da leitura no tempo “t” é somada à incerteza no tempo “t+ Δt ” e, então, tem-se que:

$$\Delta H = (H_{t+\Delta t} \pm \lambda) - (H_t \pm \lambda) = (H_{t+\Delta t} - H_t) \pm 2\lambda \quad (4.8)$$

Onde:

- ΔH : recalque medido entre os tempos “t” e “t+ Δt ”;
- H_t e $H_{t+\Delta t}$: recalques no tempo “t” e “t+ Δt ”, respectivamente;
- λ : incerteza

Ou seja, a evolução dos recalques medidos deve ser vista como uma faixa de valores de amplitude igual a 4λ (portanto, 2λ acima e 2λ abaixo do valor médio). As Figuras A6.1 a A6.7 do Anexo 6 mostram as faixas de incerteza para os sete pontos monitorados em Camboinhas.

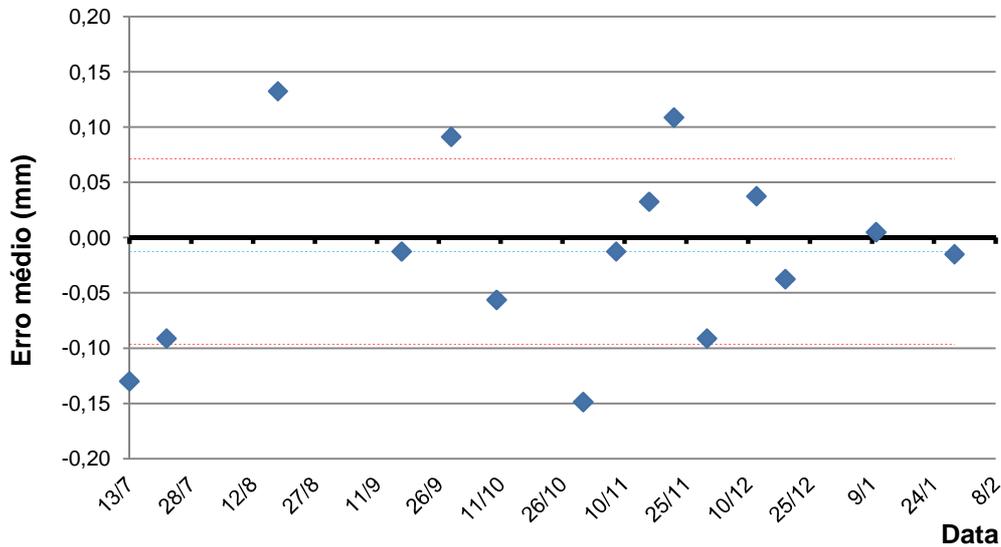


Figura 4.13 – Análise dos erros das medições de recalque

- **Influência da variação do nível d'água**

A variação do nível d'água (NA) local, devido aos períodos chuvosos, levantou a hipótese de que os ciclos de umedecimento e secagem do solo arenoso superficial e, portanto, a diminuição e o aumento das tensões efetivas atuantes no solo mole, respectivamente, pudessem influenciar os valores de recalque medidos.

Com base nos dados obtidos nos ensaios de laboratório, calculou-se o valor deste recalque, utilizando-se a equação (4.9).

$$\rho_{pf} = H \left[\frac{C_r}{1 + e_o} \log \left(\frac{\sigma'_{vf}}{\sigma'_{vo}} \right) \right] \quad (4.9)$$

Onde:

- σ'_{vo} : tensão vertical efetiva inicial (NA em cota mais baixa);
- σ'_{vf} : tensão vertical efetiva final (NA superficial).

Ressalta-se que, como não foram instalados medidores de nível d'água, para aferir as variações do NA com exatidão, este valor foi estimado porque, em perío-

dos chuvosos, o NA situava-se na superfície do terreno (Figura 4.14a) e, em períodos de estiagem, não era possível identificar este nível, nem mesmo nos pontos onde, no trabalho de Russo Neto (1980), foram instaladas as placas de recalque, os quais apresentavam profundidades de cerca de 40 cm (Figura 4.14b).

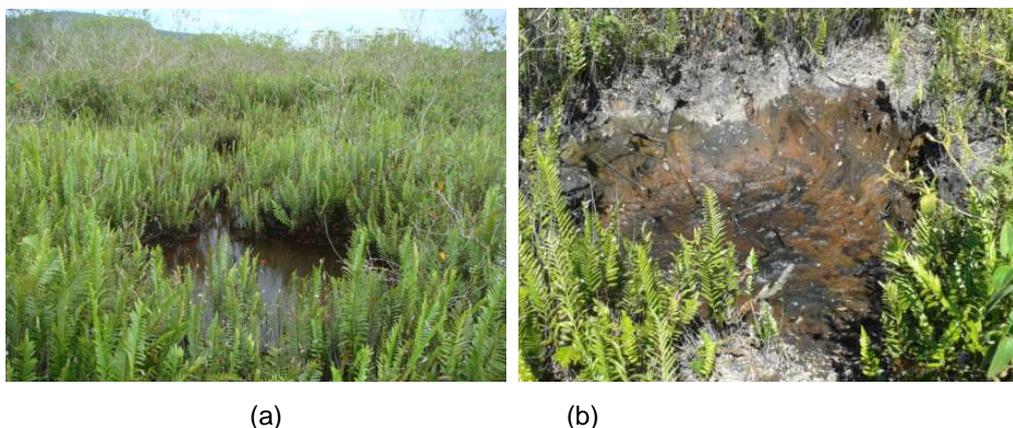


Figura 4.14 – NA nos locais das antigas placas de recalque (a) Superficial; (b) Abaixo da superfície.

A Tabela 4.9 apresenta os dados utilizados e o deslocamento obtido, de -1.55 cm (expansão). Este valor, alto em relação aos recalques medidos, deve ser analisado com cautela, porque o deslocamento ocorre com o tempo, à medida que os excessos de poropressão se dissipam. Se algum tempo depois o NA desce, os excessos de poropressão invertem de valor e começam novamente a dissipar, gerando, desta maneira, deslocamentos no sentido contrário.

Em resumo, as variações de NA provocam deslocamentos com o tempo em sentidos opostos que provavelmente justificam as pequenas subidas e descidas observadas na Figura 4.12, mas não interferem, na opinião do autor, na tendência geral das medições.

As condições do tempo foram anotadas em cada medição de recalque. O autor acredita que, confrontando-se estas informações (terreno alagado, úmido, seco) com o recalque teórico calculado acima, há influência da variação do NA no valor das tensões efetivas e, conseqüentemente, dos recalques. Mas, pelas razões expostas no parágrafo anterior, não há interferência significativa. Ou seja, a influência da compressão secundária é maior, a longo prazo, que a influência da variação do NA. Entretanto, recomenda-se que o acompanhamento dos recalques seja monitorado por períodos maiores, para confirmar (ou não) estas hipóteses.

Prof. (m)		Alt. méd. camada (m)	Amostra	W (%)	γ_{sat} (kN/m ³)	Cr/(1+e)	σ'_p	γ_{sat} at. (kN/m ³)	σ_v (kPa)	u_o (kPa)	σ'_{vo} (kPa)	σ'_{vf} (kPa)	u_f (kPa)	σ'_{vf} (kPa)	ρ_{pf} (m)
0,0	0,5	0,25	1	99,19	13,56	0,07	28,38	20,50	38,24	15,50	22,74	34,85	17,00	17,85	-0,0035
0,5	1,0								45,02	20,50	24,52	45,02	22,00	23,02	-0,0009
1,0	1,5								51,80	25,50	26,30	51,80	27,00	24,80	-0,0009
1,5	2,0								58,58	30,50	28,08	58,58	32,00	26,58	-0,0008
2,0	2,5								65,36	35,50	29,86	65,36	37,00	28,36	-0,0008
2,5	3,0								72,14	40,50	31,64	72,14	42,00	30,14	-0,0007
3,0	3,5		5	195,34	11,76	0,04	50,00		78,02	45,50	32,52	78,02	47,00	31,02	-0,0004
3,5	4,0								83,90	50,50	33,40	83,90	52,00	31,90	-0,0004
4,0	4,5		2	576,19	10,60	0,06	55,00		89,20	55,50	33,70	89,20	57,00	32,20	-0,0006
4,5	5,0								94,51	60,50	34,01	94,51	62,00	32,51	-0,0006
5,0	5,5		3	190,37	12,00	0,08	52,20		100,51	65,50	35,01	100,51	67,00	33,51	-0,0007
5,5	6,0								106,51	70,50	36,01	106,51	72,00	34,51	-0,0007
6,0	6,5		4	288,38	11,31	0,06	51,80		112,16	75,50	36,66	112,16	77,00	35,16	-0,0005
6,5	7,0								117,82	80,50	37,32	117,82	82,00	35,82	-0,0005
7,0	7,5		6	126,99	11,94	0,03	43,50		123,79	85,50	38,29	123,79	87,00	36,79	-0,0002
7,5	8,0								129,76	90,50	39,26	129,76	92,00	37,76	-0,0002
8,0	8,5		7	322,40	11,19	0,07	47,20		135,35	95,50	39,85	135,35	97,00	38,35	-0,0006
8,5	9,0								140,94	100,50	40,44	140,94	102,00	38,94	-0,0006
9,0	9,5								146,54	105,50	41,04	146,54	107,00	39,54	-0,0006
9,5	10,0								152,46	110,50	41,96	152,46	112,00	40,46	-0,0006
10,0	10,5	8	202,75	11,84	0,08	56,00	158,38	115,50	42,88	158,38	117,00	41,38	-0,0006		
Recalque total (m):														-0,0155	

Tabela 4.9 – Cálculo do recalque devido à variação do NA

4.3 Estimativa de Recalques

Como parte da comparação entre os resultados dos ensaios de laboratório e das medições de campo, estimou-se o recalque total esperado para o aterro experimental de Camboinhas, bem como o tempo necessário para que este ocorra.

4.3.1 Recalque Primário

Carvalho (1980), por meio de ensaios de adensamento com amostras extraídas antes da execução do aterro experimental, encontrou um valor médio para c_v de $5 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}$.

Adotando-se os parâmetros do referido trabalho (Tabela 4.10), pode-se calcular o recalque primário pela equação bilinear logarítmica (4.10):

$$\rho_{pf} = H \left[\frac{C_r}{1 + e_o} \log \left(\frac{\sigma'_p}{\sigma'_{vo}} \right) + \frac{C_c}{1 + e_o} \log \left(\frac{\sigma'_{vf}}{\sigma'_p} \right) \right] \quad (4.10)$$

O valor encontrado para o recalque primário foi de 1,75 m. Este valor pode ser considerado como adequado, uma vez que a camada de solos moles apresenta, atualmente, cerca de 10 m de espessura. Ou seja, supõe-se que o aterro sofreu um recalque da ordem de 2 m, desde que foi executado.

Entretanto, o tempo estimado para o término do recalque primário foi de 2,28 anos, apenas. Este valor é, aparentemente, muito baixo, tratando-se de uma camada com cerca de 12 m de espessura inicial. Os valores encontrados por Sandroni et al. (1981) também sugerem tempos de término do primário muito baixos.

Decidiu-se, então, adotar o valor de c_v encontrado nos ensaios de adensamento desta pesquisa, de $1,51 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}$. Este valor concorda com valores encontrados por Carvalho (1980), antes da execução do aterro.

Com o valor de c_v adotado ($1,51 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}$), calculou-se o término do recalque primário em 8,53 anos. Este resultado e o valor de velocidade de deformação específica ($\dot{\epsilon}$) encontrados indicam que, atualmente, ocorrem recalques secundários, somente. Pode-se considerar que os excessos de poropressão gerados pelo aterro estão totalmente dissipados.

Prof. (m)		Alt. méd. cam. (m)	Amostra	W (%)	γ_{sat} (kN/m ³)	Cc/(1+e)	Cr/(1+e)	CvNA (cm ² /s)	CvNA (m ² /ano)	σ_{vo} (kPa)	u (kPa)	σ'_{vo} (kPa)	σ'_p (kPa)	γ_{sat} at. (kN/m ³)	σ'_{vf} (kPa)	ρ_{pf} (m)
0,0	0,5	0,25	1	416,00	1,16	0,3172	0,0875	1,51E-03	4,54E+00	0,29	0,25	0,04	1,10	2,05	3,53	0,1432
0,5	1,0									0,87	0,75	0,12			3,61	0,1239
1,0	1,5									1,45	1,25	0,20			3,69	0,1157
1,5	2,0									2,03	1,75	0,28			3,77	0,1107
2,0	2,5									2,61	2,25	0,36			3,85	0,1074
2,5	3,0									3,19	2,75	0,44			3,93	0,1050
3,0	3,5		2	342,00	1,15	0,3754	0,0625			3,77	3,25	0,52	1,60		4,00	0,0901
3,5	4,0									4,34	3,75	0,59			4,08	0,0897
4,0	4,5		3	204,00	1,18	0,3527	0,0400			4,93	4,25	0,68	2,40		4,17	0,0532
4,5	5,0									5,52	4,75	0,77			4,26	0,0537
5,0	5,5									6,11	5,25	0,86			4,35	0,0544
5,5	6,0									6,64	5,75	0,89			4,37	0,0805
6,0	6,5		4	363,00	1,05	0,4983	0,1675			7,16	6,25	0,91	3,20		4,40	0,0801
6,5	7,0									7,76	6,75	1,01			4,50	0,0507
7,0	7,5		5	255,00	1,20	0,4980	0,1275			8,36	7,25	1,11	4,00		4,60	0,0505
7,5	8,0									8,95	7,75	1,20			4,69	0,0445
8,0	8,5									9,54	8,25	1,29			4,78	0,0455
8,5	9,0		6	285,00	1,18	0,5713	0,0850			10,12	8,75	1,37	3,90		4,85	0,0573
9,0	9,5									10,69	9,25	1,44			4,93	0,0573
9,5	10,0									11,31	9,75	1,56			5,05	0,0396
10,0	10,5	7	234,00	1,15	0,5317	0,1500	11,93	10,25	1,68	4,40	5,17	0,0405				
10,5	11,0						12,55	10,75	1,80		5,28	0,0415				
11,0	11,5						13,45	11,25	2,20		5,69	0,0551				
11,5	12,0	8	186,00	1,24	0,5182	0,1075	14,35	11,75	2,60	2,75	6,09	0,0584				
Recalque primário (m):													1,75			

Tabela 4.10 – Cálculo do recalque primário com dados (à exceção de c_v) de Carvalho (1980)

4.3.2 Recalque Secundário

O recalque secundário final, esperado para o aterro experimental de Camboninhas, foi estimado utilizando-se a equação (4.11), proposta por Bjerrum (1973) e o método de Asaoka (1978).

$$\rho_{sf} = H \left[\frac{C_c}{1 + e_o} \log \left(\frac{p_c}{p_o} \right) \right] \quad (4.11)$$

Nesta equação, a razão entre $p_c (= \sigma'_p)$ e $p_o (= \sigma'_{vo})$ representa o valor de OCR para o qual, em síntese, cessa o recalque secundário, comumente denominado OCR_{sf} . Entretanto, este valor é desconhecido, por não se saber o tempo necessário para o fim do recalque secundário, e deve ser estimado.

A estimativa de OCR_{sf} foi feita por meio do método de Asaoka (1978), ajustando-se uma curva logarítmica (equação 4.12) à curva de recalques médios, obtida pela média dos valores de recalque de todos os pontos, em cada dia de medição (Figura 4.15). O eixo das abscissas deve levar em conta a data de execução do aterro.

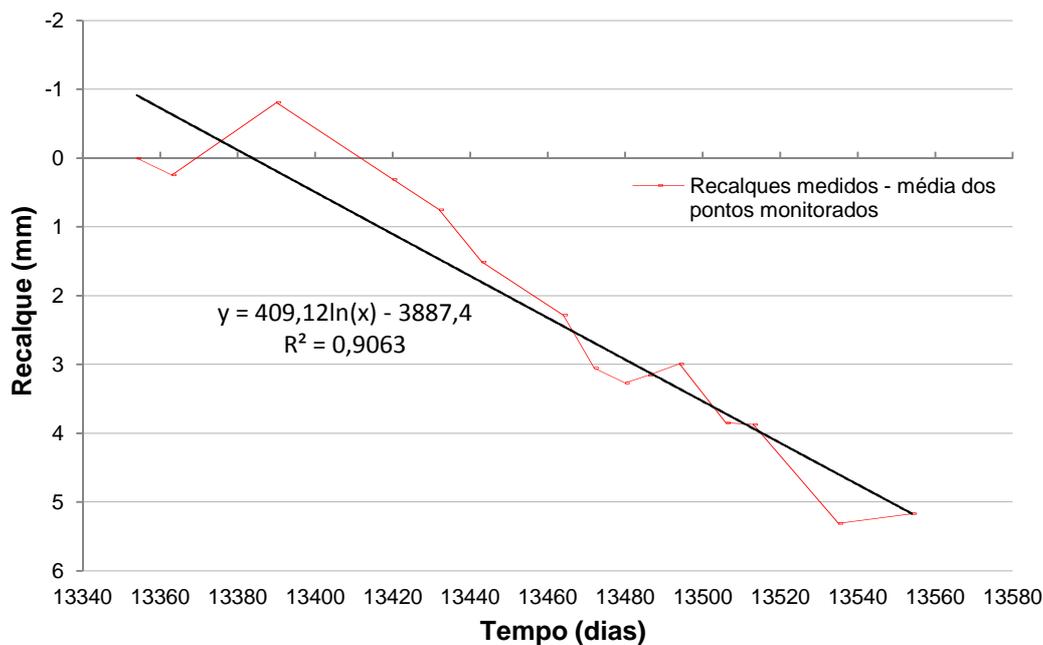


Figura 4.15 – Recalques médios e curva logarítmica de ajuste

$$y = 409,12 \ln(x) - 3887,4 \quad (4.12)$$

A esta relação logarítmica, traçou-se o gráfico da Figura 4.16, ajustando-se uma linha de tendência linear aos pontos. Com a equação da reta de ajuste (4.13), calcula-se o recalque secundário final por meio da equação (4.14):

$$y = 0,9993x + 0,3055 \quad (4.13)$$

$$\rho_{sf} = \frac{b}{1 - a} \quad (4.14)$$

Onde:

- $a = 0,9993$
- $b = 0,3055 \text{ mm}$

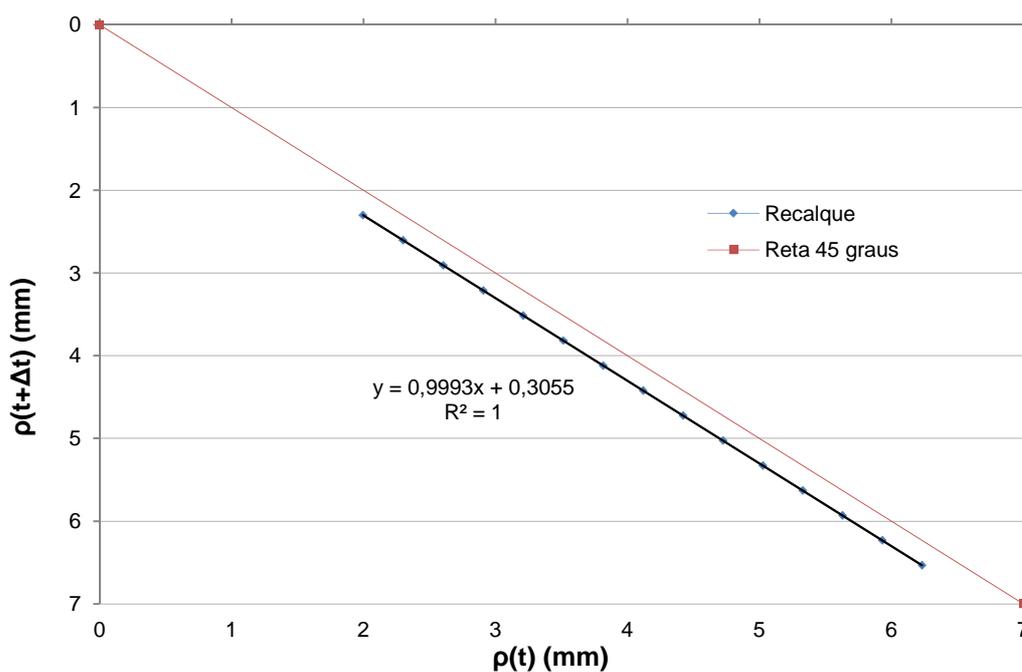


Figura 4.16 – Aplicação do Método de Asaoka

Desta forma, obteve-se um valor de 437 mm (43,7 cm) para o recalque secundário final. Substituindo este valor na equação (4.11), e considerando a camada com 10 m de espessura, obtém-se um valor de OCR_{sf} igual a 1,20. O valor de $C_c/(1+e_o)$ utilizado foi de 0,45, obtido pela média dos valores encontrados nos ensaios de adensamento convencionais desta pesquisa e do trabalho de Carvalho (1980).

Substituindo o valor de recalque obtido pelo método de Asaoka (1978) na equação (4.12), estimou-se o tempo para o término do recalque secundário (t_{sf}):

$$437 = 409,12 \ln(t_{sf}) - 3887,4$$

$$\Rightarrow t_{sf} = 38962 \text{ dias} = 106,75 \text{ anos}$$

Estimou-se, também, o tempo de início do recalque secundário (t_{si}), substituindo o valor $\rho_{sf} = 0$ na equação (4.12). Entretanto, o valor encontrado (36,67 anos) não está coerente com o tempo de término do adensamento primário (8,53 anos, correspondentes a $U = 95\%$).

$$0 = 40,912 \ln(t_{sf}) - 388,74$$

$$\Rightarrow t_{si} \cong 13385 \text{ dias} = 36,67 \text{ anos}$$

- **Evolução dos recalques com o tempo**

Com base na curva de interpolação dos recalques médios medidos em campo (Figura 4.15), determinou-se o valor de $C_\alpha/(1+e_o)$, por meio da equação (4.4), escolhendo-se dois pares de valores (ρ_t, t) e ($\rho_{t+\Delta t}, t+\Delta t$) da curva. Quando $\rho_t = 1$ mm, $t = 13417,32$ dias, e quando $\rho_{t+\Delta t} = 5$ mm, $t+\Delta t = 13549,15$ dias.

$$\frac{C_\alpha}{1 + e_o} = \frac{\rho_{t+\Delta t} - \rho_t}{H \log\left(\frac{t + \Delta t}{t}\right)} \quad (4.4)$$

Desta forma, com $H = 10000$ mm (= 10 m), $C_\alpha/(1+e_o) = 0,094$.

Com os valores de recalque primário final ($\rho_{pf} = 1,75$ m), tempo de término do recalque primário ($t_{pf} = 8,53$ anos, igual ao tempo de início do recalque secundário, para $U = 95\%$), recalque secundário final ($\rho_{sf} \cong 0,49$ m), tempo estimado de término do recalque secundário ($t_{sf} = 106,75$ anos) e no valor de $C_\alpha/(1+e_o)$, traçou-se a curva de evolução dos recalques ao longo do tempo (Figura 4.17). Os recalques secundários foram determinados de acordo com a equação (4.15).

$$\rho_s(t) = \rho_{pf} + H \frac{C_\alpha}{1 + e_o} \log \frac{t}{t_{pf}} \quad (4.15)$$

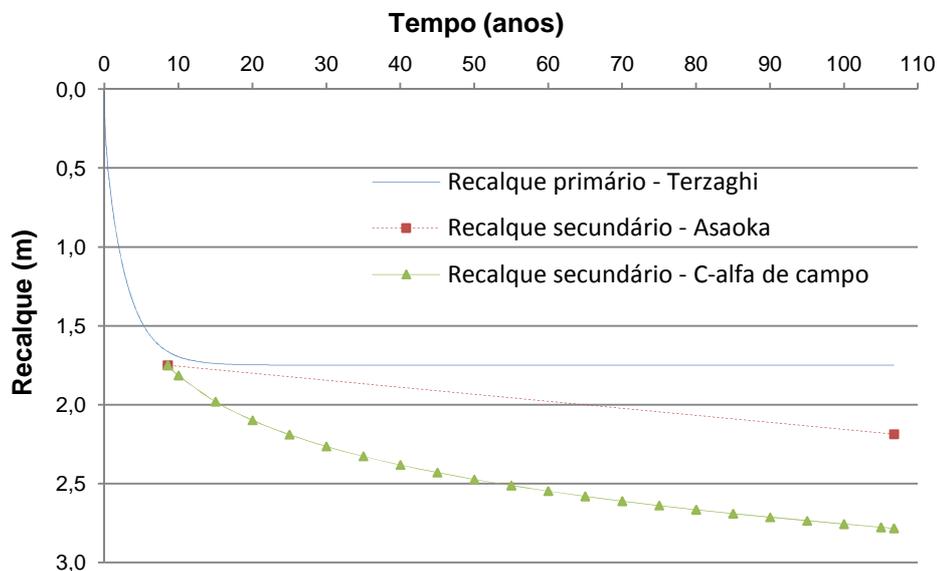


Figura 4.17 – Evolução dos recalques primário e secundário - $C_\alpha/(1+e_o) = 0,094$

Nota-se que, ao término dos 106,75 anos (t_{sf}), o recalque total obtido pelo método de Asaoka (2,19 m) é menor que o recalque calculado com a utilização de C_α de campo (2,78 m). Evidentemente, deve-se mencionar que o recalque secundário determinado a partir da equação (4.15) sempre aumentará, à medida que o tempo for aumentando.

Alterando-se o valor de OCR_{sf} na equação (4.11) para o valor de 1,60, encontram-se valores iguais de recalque final.

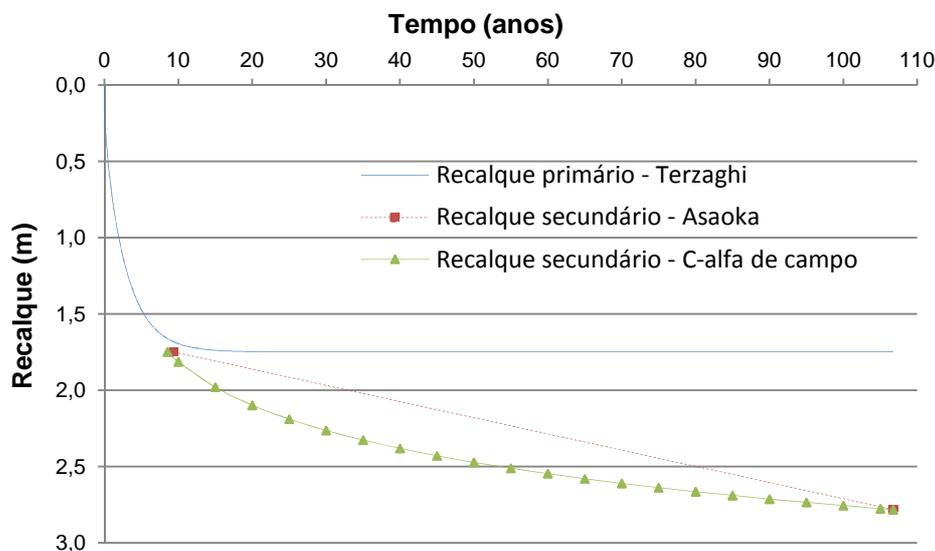


Figura 4.18 – Recalques estimados - $OCR_{sf} = 1,60$