

CONTRATO N°.: **1.06.128**

N° CLIENTE :

Nº PLANAVE: **RL-B15-B66-001**

TÍTULO: **PROJETO CONCEITUAL - ESTIMATIVA DE RECALQUES**

CONTROLE DE REVISÃO DAS FOLHAS

Rev. doc.					Rev. doc.					Rev. doc.					Rev. doc.				
Revisão da folha					Revisão da folha					Revisão da folha					Revisão da folha				
1	0				26					51					76				
2	0				27					52					77				
3	0				28					53					78				
4	0				29					54					79				
5	0				30					55					80				
6	0				31					56					81				
7	0				32					57					82				
8	0				33					58					83				
9	0				34					59					84				
10	0				35					60					85				
11	0				36					61					86				
12	0				37					62					87				
13	0				38					63					88				
14	0				39					64					89				
15	0				40					65					90				
16	0				41					66					91				
17	0				42					67					92				
18	0				43					68					93				
19	0				44					69					94				
20	0				45					70					95				
21	0				46					71					96				
22					47					72					97				
23					48					73					98				
24					49					74					99				
25					50					75					100				

REV.

DESCRIÇÃO DAS REVISÕES

0

EMISSÃO INICIAL

	REV. 0	REV.	REV.	REV.	REV.	REV.	REV.
DATA	19/04/07						
EXECUTADO	E.M.						
VERIFICADO	M.A.						
APROVADO	H.J.C.S.						

ÍNDICE

	Pág.
Resumo Executivo	3
1. Modelos Geomecânicos	4
2. Recalques	7
2.1 Recalque Total por Adensamento Primário	7
2.2 Recalque Total por Adensamento Secundário	10
3. Aceleração de Recalques	12
4. Construção em Etapas	14
4.1 Modelo I	15

RESUMO EXECUTIVO

Este relatório analisa a questão de recalques visando a construção do aterro na beira do cais da Granel Química em Alemoa. A análise das sondagens realizadas na área definiu um perfil geotécnico médio e um perfil geotécnico pessimista. Para as estimativas de magnitude e de velocidade de recalques neste projeto conceitual, foram utilizados os parâmetros geotécnicos disponíveis na literatura.

A espessura de aterro necessária para colocar o aterro na cota +4,25, estabilizado em termos de recalques primários e com sobrecarga de 2,2 m para a carga futura de contêineres (40 kPa) é de cerca de 9,0 m, podendo alcançar 11,0 m em áreas com grande espessura de argila mole.

Para a aceleração dos recalques serão utilizados drenos espaçados em 1,60 m em malha triangular (1 dreno a cada 2,2 m²), e sobrecarga temporária adicional de cerca de 2,3 m. Portanto a sobrecarga total a ser removida ao final será de cerca de 4,5 m de aterro. Os drenos serão apenas cravados na camada de argila mole superior (SFL). Na argila mole inferior (AT) bastará a atuação de sobrecarga temporária para estabilizar os recalques. O aterro precisará ser alteado em duas etapas, tendo em vista a baixa resistência da argila mole. O tempo total de estabilização de recalques primários será de cerca de 1 ano, sendo 10 meses de adensamento e 2 meses de terraplanagem para alteamento do aterro.

Após a estabilização de recalques primários ocorrerão recalques secundários. Assim, ao longo dos anos será necessária a recomposição do pavimento da retroárea, de tempos em tempos, cerca de 0,25 m nos primeiros 2 anos, 0,25 m nos próximos 4 anos, 0,25 m nos próximos 8 anos, e assim por diante.

Todos os valores quantitativos mencionados acima têm uma margem de erro e servem apenas como valores indicativos para tomada de decisões preliminares. Para a estimativa mais precisa destes números visando o Projeto Executivo será necessária a realização das sondagens adicionais programadas, assim como de investigações complementares de campo e de laboratório.

1. MODELOS GEOMECÂNICOS

Foram considerados dois modelos geomecânicos para a estimativa dos recalques totais; estes modelos foram definidos em estudos baseados nas sondagens executadas no local.

As modelagens foram definidas a partir das espessuras máximas e médias das camadas de sedimento caracterizadas pelas sondagens e da cota do nível do terreno, conforme apresentado na Tabela 1.1. Assim, o Modelo I consiste nos valores médios obtidos e o Modelo II os máximos valores determinados.

Tabela 1.1 - Determinação dos Modelos

Seção	Sondagem	Cota da Boca (m)	Espessuras das Camadas (m)			
			Aterro/Areia	SFL	Areia	ATL
1-1	SP-3 N _{SPT}	0,00	5,5	8 + 9 (1 a 3)	5,5	5,0 (6 a 7)
	SP-2 N _{SPT}	0,00	1,0	28,0 (1 a 3)	2,0	5,0 (6 a 8)
	SP-1 N _{SPT}	0,00	8,5	12,5 (1 a 3)	-	-
2-2	SPTT-1 N _{SPT}	0,72	2,5	9,5 + 11,5 (1 a 3)	4,0	3 + 3 (6 a 9)
	SP-14 N _{SPT}	0,00	3,0	8 + 12 (1) (2 a 4)	6,0	5,0 (5 a 6)
3-3	SPTT-3 N _{SPT}	0,72	-	11 + 8 (0 a 2) (3 a 4)	7,0	4,0 (4 a 5)
4-4	SP-35 N _{SPT}	0,00	2,0	18,0 (0 a 3)	10,0	5,0 (4 a 11)
5-5	SPTT-5 N _{SPT}	0,72	-	12 + 8 (0 2) (2 a 5)	5,0	4,0 (8 a 10)
6-6	SPTT-7 N _{SPT}	0,75	1,0	10 + 6 (0 1) (2 a 6)	8,0	2,0 (8)

As características geotécnicas e as propriedades de engenharia dos sedimentos marinhos do litoral paulista foram estimados a partir de parâmetros indicados na literatura técnica em correlações com os valores de N_{SPT} das sondagens executadas no local. Estes parâmetros estão indicados na Tabela 1.2.

Tabela 1.2 - Parâmetros Geotécnicos

Material	γ (kN/m ³)	c_v (m ² /s)	$C_c/1+e_0$	C_s / C_c	σ'_{vm}
Areia 1 / Aterro Existente	16,0	-	-	-	-
Areia 2	17,0	-	-	-	-
SFL (sedimento flúvio-lagunar)	13,5	20,00 x 10 ⁻⁸	0,43	0,12	30+5z
AT (argila transicional)	15,0	20,00 x 10 ⁻⁸	0,39	0,12	30+5z
Aterro Novo	18,0	-	-	-	-

Simbologia:

- γ = peso específico;
- c_v = coeficiente de adensamento vertical;
- $C_c/1+e_0$ = compressibilidade oedométrica;
- z=profundidade a partir do nível do terreno.

Foi considerada uma sobrecarga temporária devido à carga de contêineires de 40 kPa, correspondente a um aterro de 2,22 m de altura.

A Figura 1.1 caracteriza os modelos adotados.

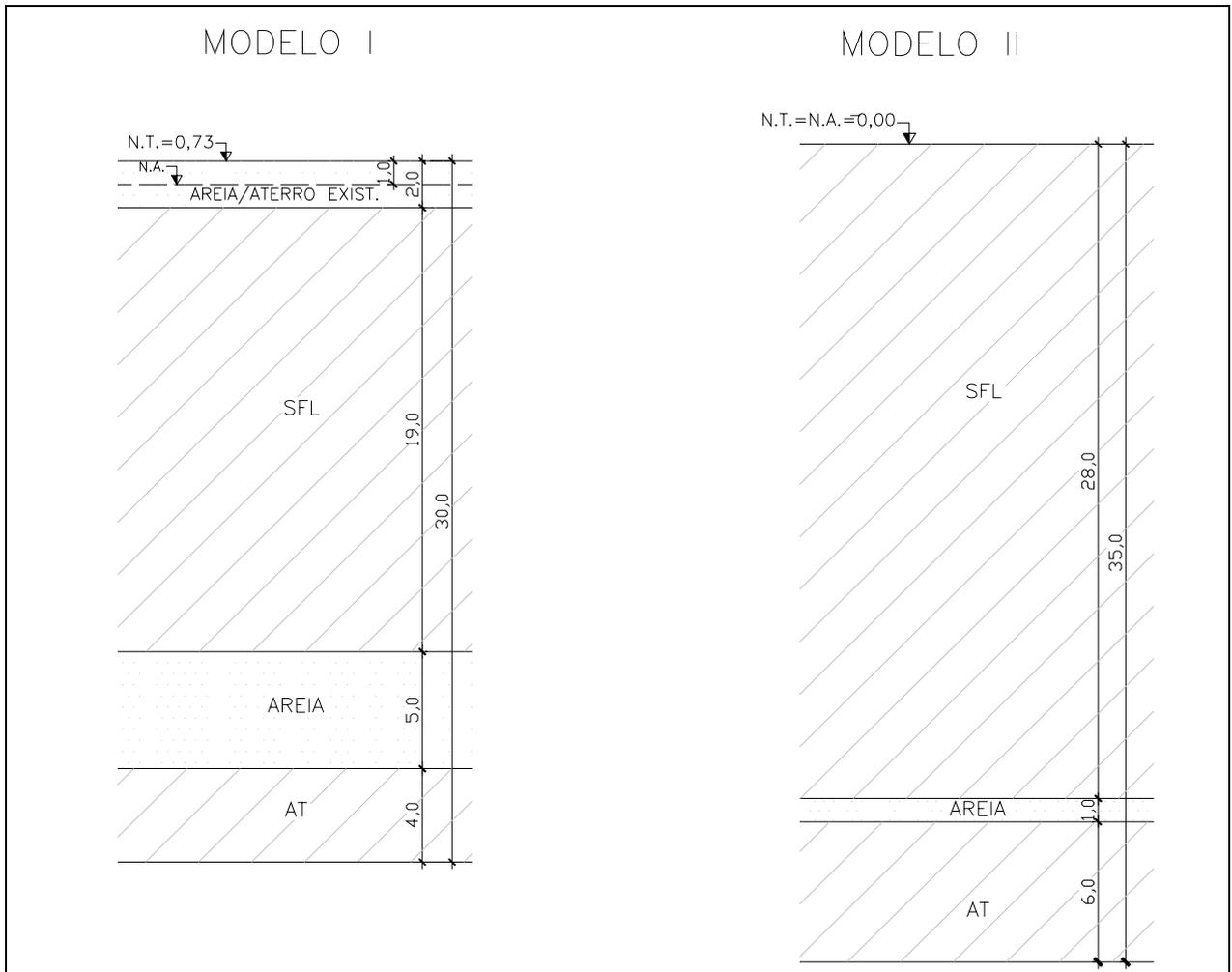


Figura 1.1 - Modelos I e II

2. RECALQUES

Os recalques totais serão estimados de acordo com os modelos geomecânicos adotados. Em virtude da grande espessura de material compressível, as camadas de SFL e AT foram divididas em subcamadas de igual espessura.

Serão estimados os recalques devido ao adensamento primário e secundário de cada camada de SFL e AT e o valor do recalque total estimado será a soma dos dois.

2.1 Recalque Total por Adensamento Primário

O recalque primário em cada camada, proveniente da carga imposta pelo aterro lançado sobre o terreno pode ser estimado pela expressão abaixo que, considerado o efeito da submersão e o cálculo, é realizado para uma cota pré-fixada (+4,25 m).

onde:

$$\Delta h = \frac{h_{arg}}{1 + e_0} \left(C_s \log \frac{\sigma'_{vm}}{\sigma'_{v0}} + C_c \log \frac{\sigma'_{v0} + \gamma h + \gamma' \Delta h + q}{\sigma'_{vm}} \right)$$

- h_{arg} = espessura da camada de argila;
- e_0 = índice de vazios inicial;
- C_c = índice de compressão;
- C_s = índice de recompressão;
- σ'_{v0} = tensão efetiva inicial;
- σ'_{vm} = tensão de pré-adensamento;
- q = sobrecarga;
- h = altura do aterro;
- γ = peso específico do aterro, e
- γ' = peso específico submerso do aterro.

2.1.1 Modelo I

Para a estimativa de recalque por adensamento primário do Modelo I, a camada de SFL foi dividida em cinco subcamadas de 3,80 m de espessura cada. As tensões verticais iniciais (σ'_{v0}) e a tensão de sobreadensamento (σ'_{vm}) estão apresentadas a seguir.

Tabela 2.1 - Cálculo de Tensões

Subcamada	Profundidade (m)	σ'_{v0} (kPa)	σ'_{vm} (kPa)
1	3,90	28,65	49,50
2	7,70	41,95	68,50
3	11,50	55,25	87,50
4	15,30	68,55	106,50
5	19,10	81,85	125,50

A Tabela 2.2 apresenta o valor estimado do recalque final para a camada de sedimento flúvio-lagunar. Para a estimativa dos recalques foram efetuadas várias tentativas de alturas finais para atingir a cota +4,25 m.

Tabela 2.2 - Estimativa dos Recalques Finais por Adensamento Primário da camada de SFL.

Iteração	h_{aterro} (m)	Δh assumido (m)	Subcamada	Δh calculado (m)	Δh total (m)	Erro
1	4,00	0,48	1	0,76	2,56	-2,075
			2	0,59		
			3	0,48		
			4	0,39		
			5	0,33		
2	5,00	1,48	1	0,80	2,73	-1,248
			2	0,63		
			3	0,51		
			4	0,42		
			5	0,36		
3	6,49	2,97	1	0,86	2,97	0,000
			2	0,68		
			3	0,56		
			4	0,47		
			5	0,40		

O valor de recalque decorrente da compressão primária na camada de SFL é de 2,97 m.

A camada de AT foi dividida em duas camadas de 2,00 m de espessura cada. As tensões verticais iniciais (σ'_{v0}) e a tensão de sobre adensamento (σ'_{vm}) de cada camada estão apresentadas a seguir.

Tabela 2.3 - Cálculo de Tensões

Subcamada	Profundidade (m)	σ'_{v0} (kPa)	σ'_{vm} (kPa)
1	27,00	128,50	165,00
2	29,00	138,50	175,00

O valor do recalque estimado para a camada de argila transicional é apresentado na Tabela 2.4 a seguir.

Tabela 2.4 - Estimativa dos Recalques Finais por Adensamento Primário da camada de AT

Iteração	h_{aterro} (m)	Δh assumido (m)	Subcamada	Δh calculado (m)	Δh total (m)	Erro
1	5,00	1,48	1	0,14	0,28	1,202
			2	0,14		
2	6,00	2,48	1	0,15	0,30	2,181
			2	0,15		
3	3,77	0,25	1	0,13	0,25	0,000
			2	0,12		

O valor do recalque para a camada de AT foi estimado em 0,25 m.

O recalque total por adensamento primário é igual a 3,22 m. A altura de aterro necessária para compensar este valor de recalque deve ser de 8,96 m.

2.1.2 Modelo II

Para a estimativa de recalque por adensamento primário do Modelo II, a camada de SFL foi dividida em cinco subcamadas de 5,60 m de espessura cada. As tensões verticais iniciais (σ'_{v0}) e a tensão de sobreadensamento (σ'_{vm}) estão apresentadas a seguir.

Tabela 2.5 - Cálculo de Tensões

Subcamada	Profundidade (m)	σ'_{v0} (kPa)	σ'_{vm} (kPa)
1	5,60	19,60	58,00
2	8,40	29,40	72,00
3	14,00	49,00	100,00
4	19,60	68,60	128,00
5	25,20	88,20	156,00

A Tabela 2.6 apresenta o valor estimado do recalque final para a camada de sedimento flúvio-lagunar. Para a estimativa dos recalques foram efetuadas várias tentativas de alturas finais para atingir a cota +4,25 m.

Tabela 2.6 - Estimativa dos Recalques Finais por Adensamento Primário da camada de SFL.

Iteração	h_{aterro} (m)	Δh assumido (m)	Subcamada	Δh calculado (m)	Δh total (m)	Erro
1	5,00	0,75	1	1,07	3,50	-2,753
			2	0,89		
			3	0,65		
			4	0,50		
			5	0,39		
2	6,00	1,75	1	1,13	3,74	-1,994
			2	0,95		
			3	0,70		
			4	0,54		
			5	0,42		
3	8,56	4,31	1	1,26	4,31	0,000
			2	1,07		
			3	0,81		
			4	0,64		
			5	0,52		

O valor de recalque decorrente da compressão primária na camada de SFL é de 4,31 m.

A camada de AT foi dividida em três camadas de 2,00 m de espessura cada. As tensões verticais iniciais (σ'_{v0}) e a tensão de sobreadensamento (σ'_{vm}) de cada camada estão apresentadas a seguir.

Tabela 2.7 - Cálculo de Tensões

Subcamada	Profundidade (m)	σ'_{v0} (kPa)	σ'_{vm} (kPa)
1	30,00	109,00	180,00
2	32,00	119,00	190,00
3	34,00	129,00	200,00

O valor do recalque estimado para a camada de argila transicional é apresentado na Tabela 2.8 a seguir.

Tabela 2.8 - Estimativa dos Recalques Finais por Adensamento Primário da camada de AT.

Iteração	h_{aterro} (m)	Δh assumido (m)	Subcamada	Δh calculado (m)	Δh total (m)	Erro
1	5,00	0,75	1	0,11	0,30	0,449
			2	0,10		
			3	0,10		
2	6,00	1,75	1	0,12	0,33	1,416
			2	0,11		
			3	0,11		
2	4,54	0,29	1	0,10	0,29	0,000
			2	0,10		
			3	0,09		

O valor do recalque para a camada de AT foi estimado em 0,29 m.

O recalque total por adensamento primário é igual a 4,60 m. A altura de aterro deverá ser de 11,07 m.

2.2 Recalque Total por Adensamento Secundário

Baseado em evidências experimentais, Martins (2005) propõe que o recalque máximo por adensamento secundário é aquele correspondente à variação de deformabilidade vertical da condição de fim de primário ($OCR = 1$) para a reta $OCR = 1,5$, para uma dada tensão efetiva vertical (σ'_{vf}) atuante na argila mole. Esta condição pode ser associada ao cálculo de recalque por adensamento primário.

O recalque por adensamento secundário pode ser estimado pela expressão abaixo.

$$\Delta h_{SEC} = 0,15 \times CR \times h_{arg}$$

onde,

$$CR = \frac{C_c}{1 + e_0}$$

2.2.1 Modelo I

A Tabela 2.9 apresenta as estimativas do recalque por adensamento secundário para as camadas de SFL e AT

Tabela 2.9 - Estimativa dos Recalques Finais por Adensamento Secundário.

Material	Espessura Camada (m)	CR	$\Delta h_{sec}(m)$
SFL	19,00	0,43	1,2255
AT	4,00	0,39	0,234
$\Delta h_{sec\ total}(m)$			1,46

Observa-se, portanto que, mesmo após a ocorrência dos recalques primários, a longo prazo podem-se ter recalques significativos, da ordem de 1,46 m, requerendo convivência com o mesmo, ou seja, haverá necessidade de manutenção na pavimentação periodicamente.

2.2.2 Modelo II

A Tabela 2.10 apresenta as estimativas do recalque por adensamento secundário para as camadas de SFL e AT.

Tabela 2.10 - Estimativa dos Recalques Finais por Adensamento Secundário.

Material	Espessura Camada (m)	CR	$\Delta h_{sec}(m)$
SFL	28,00	0,43	1,806
AT	6,00	0,39	0,351
$\Delta h_{sec\ total}(m)$			2,16

Observa-se, portanto que, mesmo após a ocorrência dos recalques primários, a longo prazo podem-se ter recalques significativos, da ordem de 2,16 m, que demandariam manutenção do pavimento.

3. ACELERAÇÃO DE RECALQUES

Uma alternativa bastante utilizada para reduzir os tempos de recalque é o emprego de uma sobrecarga temporária em conjunto com a utilização de drenos. Esta técnica consiste na aplicação de um pré-carregamento que acelera os recalques e reduz os efeitos de recalques futuros. Uma vez atingido o recalque final para a altura de projeto, a sobrecarga pode ser removida, e os recalques decorrentes do adensamento primário cessarão, uma vez que para a altura remanescente, todo o recalque já terá ocorrido.

A utilização de drenos acelera os recalques, pois como os coeficientes são geralmente maiores na direção horizontal que na vertical, há uma diminuição nas distâncias de percolação, portanto os recalques se desenvolvem mais rapidamente.

Foram utilizados drenos somente para a camada de SFL. Para esta análise foi considerada drenagem puramente radial, na qual:

$$\bar{U} = \bar{U}_h$$

- Então,

$$\bar{U}_h = 0,95$$

Para a condição de deformações verticais iguais (*equal strain*) o grau de adensamento médio (\bar{U}_h) pode ser determinado por:

$$\bar{U}_h = 1 - e^{-8T_h/F_n}$$

onde:

- T_h = fator tempo para a drenagem horizontal;
- F_n = função da densidade de drenos

O fator T_h e F_n podem ser obtidos pelas expressões a seguir:

$$T_h = \frac{c_h \cdot t}{d_e^2}$$

$$F(n) = \ln(n) - 0,75$$

onde:

- d_e = diâmetro de influência de um dreno;
- t = tempo para que o adensamento ocorra neste caso;

$$n = \frac{d_e}{d_w}$$

sendo:

- d_w = diâmetro equivalente do dreno.

Os drenos verticais são instalados em malhas quadradas ou triangulares. Sendo a malha triangular mais eficiente e econômica que a malha quadrangular, então adotada-se a malha triangular:

$$d_e = 1,05 \cdot l$$

- l = espaçamento entre drenos, sendo adotado $l = 1,60$ m.

Quanto menor for o espaçamento (l) entre os drenos, menor é o tempo necessário para atingir 95% dos recalques finais.

As dimensões do dreno sintético devem ser representadas por um diâmetro equivalente (d_w). Estudos numéricos realizados por Rixner *et al.*(1986) e apoiados por Hansbo (1987) sugerem que o diâmetro equivalente do dreno pode ser expresso pela equação abaixo:

$$- d_w = \frac{(a + b)}{2}$$

onde:

- a e b = dimensões do dreno pré-fabricado, sendo utilizado a = 10 cm e b = 0,5 cm.

Para o cálculo de F(n) devem ser considerados os efeitos do amolgamento na instalação do dreno (smear).

Quando se considera o amolgamento, deve-se acrescentar ao valor de F(n) o valor de F_s (Hansbo, 1981):

$$- F_s = \left(\frac{k_h}{k'_h} - 1 \right) \ln s$$

onde:

- s = 1,5 para drenos pré-fabricados;
- k'_h = permeabilidade horizontal da área afetada pelo amolgamento.
- Foi adotado $c_v = c_h = 20 \times 10^{-8}$ m/s

O valor de k'_h depende da realização de ensaios especiais, mas pode ser estimado pela correlação (Hansbo, 1981).

4. CONSTRUÇÃO EM ETAPAS

A construção em etapas do aterro é adotada quando o mesmo não é estável para a construção em uma única etapa ou quando para a construção em uma etapa somente pode ser realizada para um talude muito abatido, o que muitas vezes significa uma berma equivalente de grande extensão. A construção em etapas objetiva o ganho de resistência do solo mole de fundação durante a primeira etapa de lançamento do aterro, antes da colocação da etapa seguinte. Para acelerar o ganho de resistência da argila utilizam-se drenos verticais.

As estimativas de recalque com o tempo foram realizadas somente para o Modelo I, onde foi considerado o efeito da submersão, onde o cálculo é iterativo conforme indicado a seguir.

Na primeira iteração, o recalque foi calculado sem considerar a submersão do aterro, conforme a equação a seguir.

$$- \Delta h_i = \frac{h_{arg}}{1 + e_0} \cdot [C_s \cdot \log \frac{\sigma'_{vm}}{\sigma'_{v0}} + C_c \frac{\log \sigma'_{v0} + \gamma h + q}{\sigma'_{vm}}]$$

Como o nível d'água é coincidente com o nível do terreno, a altura do aterro divide-se em h_1 (trecho não submerso) e h_2 (trecho submerso), sendo $h_2 = \Delta h$.

Na segunda iteração foi considerado o efeito da submersão, de acordo com a equação a seguir.

$$- \Delta h = \frac{h_{arg}}{1 + e_0} (C_s \log \frac{\sigma'_{vm}}{\sigma'_{v0}} + C_c \log \frac{\sigma'_{v0} + \gamma h_1 + \gamma' h_2}{\sigma'_{vm}})$$

Os cálculos foram feitos até os valores dos recalques convergirem, ou seja, até que $\Delta h_{i+1} = \Delta h_i$.

O cálculo da variação dos recalques da primeira etapa até o tempo t_1 , onde foi adotado um grau de adensamento de 90%, foi feito de acordo com a expressão:

$$- \Delta h_{1t}(t) = \Delta h_{1t} \cdot U_{t1}$$

Para aceleração dos recalques fora utilizada malha com os elementos espaçados de 1,60m, conforme mostrado a seguir.

Tabela 4.1 - Dimensionamento de Drenos

Característica dos Drenos	
d_e (m)	1,68
a (cm)	10
b (cm)	0,5
dw (cm)	5,25
n	32,00
$F(n)$	2,716
F_s	0,405
W_q	17,45
F_m	2,934

O comprimento característico dos drenos (L), no Modelo I, foi estimado em 9,5 m, ou seja, metade da espessura da camada de SFL, e o valor de z é igual a 4,75m.

4.1 Modelo I

As estimativas de recalques foram desenvolvidas separadamente para a camada de SFL, com utilização de drenos, e para a camada de AT, sendo o recalque total a soma das duas parcelas.

Para a 1ª Etapa foi adotado um aterro com 6,0 m de altura e uma sobrecarga de 40 kPa, que corresponde a um aterro de 2,22 m de altura, e na 2ª Etapa foi adotado um aterro de 3,0 m, o que soma 11,22 m de aterro. Como a espessura necessária de aterro era de 8,96 m (com os 2,22 m de sobrecarga) e está se adotando 11,22 m, tem-se uma sobrecarga total de 4,48 m.

4.1.1 Estimativa dos Recalques Referentes à 1ª Etapa

De forma similar à estimativa de recalque por adensamento primário, a camada de SFL foi subdividida em cinco camadas de 3,80 m de espessura e a camada de AT foi dividida em duas subcamadas de 2,00 m cada.

O recalque total estimado para essa altura de aterro foi de 2,82 m, conforme Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Estimativa de Recalques - 1ª Etapa - SFL.

Iteração	Profundidade (m)	Δh (m)	Δh total (m)
1	3,90	0,95	3,36
	7,70	0,77	
	11,50	0,64	
	15,30	0,54	
	19,10	0,47	
2	3,90	0,80	2,71
	7,70	0,63	
	11,50	0,51	
	15,30	0,42	
	19,10	0,35	
3	3,90	0,83	2,85
	7,70	0,66	
	11,50	0,54	
	15,30	0,45	
	19,10	0,38	
4	3,90	0,82	2,82
	7,70	0,65	
	11,50	0,53	
	15,30	0,44	
	19,10	0,37	
5	3,90	0,83	2,82
	7,70	0,65	
	11,50	0,53	
	15,30	0,44	
	19,10	0,37	

A Tabela 4.3 apresenta o valor do recalque da camada de AT, que foi estimado em 0,35m.

Tabela 4.3 - Estimativa de Recalques - 1ª Etapa - AT.

Iteração	Profundidade (m)	Δh (m)	Δh total (m)
1	27,00	0,19	0,36
	29,00	0,18	
2	27,00	0,18	0,35
	29,00	0,17	

O recalque total referente à 1ª etapa de construção é de 3,17 m.

O tempo para que ocorra o grau de adensamento adotado, $U=90\%$, na camada de SFL é de aproximadamente 5,3 meses e na camada de AT será de 6,5 meses, portanto o tempo para o início da 2ª etapa deverá ser de 6,5 meses, conforme apresentado nas Tabelas 4.4 e 4.5. Cabe ressaltar que para a camada de SFL o adensamento foi acelerado com a utilização de drenos, sendo considerada drenagem radial, e no caso da camada de AT a drenagem é puramente vertical.

Tabela 4.4 - Recalque x Tempo de Adensamento - SFL.

t (meses)	T_h	U_h (%)	ρ_{1-SFL} (m)
0,00	0,000	0,000	0,000
0,02	0,003	0,677	0,019
0,06	0,011	2,614	0,074
0,14	0,025	5,833	0,165
0,24	0,045	10,113	0,285
0,38	0,070	15,355	0,433
0,55	0,100	21,341	0,602
0,74	0,136	27,865	0,787
0,97	0,179	34,806	0,983
1,23	0,225	41,716	1,178
1,52	0,279	48,771	1,377
1,84	0,339	55,580	1,569
2,21	0,407	62,260	1,758
2,62	0,482	68,475	1,933
3,11	0,571	74,546	2,104
3,68	0,676	80,201	2,264
4,38	0,804	85,414	2,411
5,28	0,969	90,196	2,546
6,54	1,202	94,382	2,664
8,70	1,599	97,829	2,762
9,41	1,728	98,406	2,778
10,30	1,892	98,925	2,793
11,57	2,126	99,386	2,806

Tabela 4.5 - Recalque x Tempo de Adensamento - AT.

t (meses)	T_v	U_v (%)	ρ_{2-AT} (m)
0,00	0,0000	0,000	0,000
0,02	0,0020	5,000	0,018
0,06	0,0078	10,000	0,035
0,14	0,0177	15,000	0,053
0,24	0,0314	20,000	0,071
0,38	0,0491	25,000	0,088
0,55	0,0707	30,000	0,106
0,74	0,0962	35,000	0,123
0,97	0,1260	40,000	0,141
1,23	0,1590	45,000	0,159
1,52	0,1970	50,000	0,176
1,84	0,2390	55,000	0,194
2,21	0,2870	60,000	0,212
2,62	0,3400	65,000	0,229
3,11	0,4030	70,000	0,247
3,68	0,4770	75,000	0,265
4,38	0,5670	80,000	0,282
5,28	0,6840	85,000	0,300
6,54	0,8480	90,000	0,318
8,70	1,1280	95,000	0,335
9,41	1,219	96,000	0,339
10,30	1,335	97,000	0,342
11,57	1,500	98,000	0,346
13,74	1,781	99,000	0,349

4.1.2 Estimativa dos Recalques Referentes à 2ª Etapa

Inicialmente, após o tempo t_1 da primeira etapa, foi realizada a atualização das espessuras de cada subcamada da tensão vertical efetiva no tempo t_1 , conforme apresentado a seguir.

- Espessura de cada subcamada: $h_{arg1} = h_{arg} - \Delta h_1 \cdot U_1(t_1)$.
- Tensão vertical efetiva no tempo t_1 : $\sigma'_{v1} = \sigma'_{v0} + U_1 \cdot (\gamma_{at} \cdot h_1)$;

Tabela 4.6 - Atualizações na Espessura e σ'_{v1} de cada Subcamada de SFL.

Profundidade (m)	σ'_{v1} (kPa)	Espessura Camada (m)
3,90	146,43	3,06
7,70	159,73	3,21
11,50	173,03	3,32
15,30	186,33	3,40
19,10	199,63	3,46

O recalque total referente à segunda etapa é função do recalque que ainda vai ocorrer para o aterro 1 após o tempo de 10 meses ($\Delta\sigma'_{v1}$) da altura do aterro 2 (h_2), onde:

- $\Delta\sigma'_{v1} = (1-U_1) \cdot (\gamma_{at} \cdot h_1)$ e,
- $\Delta\sigma'_{v2} = \gamma_{at} \cdot h_2$.

Os valores encontrados para a camada de sedimento flúvio-lagunar foram:

- $\Delta\sigma'_{v1} = 10,59$ kPa e,
- $\Delta\sigma'_{v2} = 54,0$ kPa

O valor de σ'_{v1} obtido foi maior que o valor de σ'_{vm} , então nesta etapa a argila encontra-se normalmente adensada e o valor de recalque foi estimado por:

$$- \Delta h_2 = \frac{h_{arg1}}{1 + e_0} \left[C_c \log \left(\frac{\sigma'_{v1} + \Delta\sigma'_{v1} + \Delta\sigma'_{v2}}{\Delta\sigma'_{v1}} \right) \right]$$

A estimativa também considerou o efeito da submersão, de forma similar ao descrito na primeira etapa.

O recalque total estimado para esta altura de aterro foi igual a 0,86 m, conforme a Tabela 4.7

Tabela 4.7 - Estimativa de Recalques - 2ª Etapa - SFL.

Iteração	Profundidade (m)	Δh (m)	Δh total (m)
1	3,90	0,21	0,98
	7,70	0,20	
	11,50	0,20	
	15,30	0,19	
	19,10	0,18	
2	3,90	0,18	0,85
	7,70	0,18	
	11,50	0,17	
	15,30	0,16	
	19,10	0,16	
3	3,90	0,19	0,87
	7,70	0,18	
	11,50	0,17	
	15,30	0,17	
	19,10	0,16	
4	3,90	0,18	0,86
	7,70	0,18	
	11,50	0,17	
	15,30	0,17	
	19,10	0,16	

A variação do recalque com o tempo para esta etapa é mostrada na Tabela 4.8. Cabe ressaltar que o tempo t_0 corresponde ao tempo $t_1 = 6,5$ meses.

Tabela 4.8 - Recalque x Tempo - SFL.

t (meses)	T_h	U_h (%)	ρ_{1-SFL} (m)
0,00	0,000	0,000	0,000
0,02	0,003	0,677	0,006
0,06	0,011	2,614	0,023
0,14	0,025	5,833	0,050
0,24	0,045	10,113	0,087
0,38	0,070	15,355	0,133
0,55	0,100	21,341	0,185
0,74	0,136	27,865	0,241
0,97	0,179	34,806	0,301
1,23	0,225	41,716	0,361
1,52	0,279	48,771	0,422
1,84	0,339	55,580	0,481
2,21	0,407	62,260	0,538
2,62	0,482	68,475	0,592
3,11	0,571	74,546	0,645
3,68	0,676	80,201	0,694
4,38	0,804	85,414	0,739
5,28	0,969	90,196	0,780
6,54	1,202	94,382	0,816
8,70	1,599	97,829	0,846
13,74	2,524	99,764	0,863

A Tabela 4.9 apresenta a tensão efetiva vertical para o tempo t_1 da camada de argila transicional.

Tabela 4.9 - Atualizações na Espessura e σ'_{v1} de cada Subcamada de AT.

Profundidade (m)	σ'_{v1} (kPa)	Espessura Camada (m)
27,00	228,24	1,84
29,00	243,64	1,85

Os incrementos nas tensões serão:

- $\Delta\sigma'_{v1} = 10,80$ kPa e,
- $\Delta\sigma'_{v2} = 54,0$ kPa

O recalque total estimado para esta altura de aterro foi igual a 0,15 m, conforme a Tabela 3.10.

Tabela 4.10 – Estimativa de Recalques – 2ª Etapa - AT.

Iteração	Profundidade (m)	Δh (m)	Δh total (m)
1	27,00	0,08	0,15
	29,00	0,07	
2	27,00	0,08	0,15
	29,00	0,07	

A variação do recalque com o tempo para esta etapa é mostrada na Tabela 4.11.

Tabela 4.11 - Recalque x Tempo - AT.

t (meses)	T_v	U_v (%)	ρ_{2-AT} (m)
0,00	0,0000	0,000	0,000
0,02	0,0020	5,000	0,007
0,06	0,0078	10,000	0,015
0,14	0,0177	15,000	0,022
0,24	0,0314	20,000	0,030
0,38	0,0491	25,000	0,037
0,55	0,0707	30,000	0,045
0,74	0,0962	35,000	0,052
0,97	0,1260	40,000	0,059
1,23	0,1590	45,000	0,067
1,52	0,1970	50,000	0,074
1,84	0,2390	55,000	0,082
2,21	0,2870	60,000	0,089
2,62	0,3400	65,000	0,096
3,11	0,4030	70,000	0,104
3,68	0,4770	75,000	0,111
4,38	0,5670	80,000	0,119
5,28	0,6840	85,000	0,126
6,54	0,8480	90,000	0,134
8,70	1,1280	95,000	0,141
13,74	1,7810	99,000	0,147

4.1.3 Recalques Totais da Construção em Etapas

O recalque total devido às duas etapas de construção é igual a 4,19 m. A altura total de aterro lançado será de 11,22 m, referentes à 1ª Etapa (6,0 m de aterro e 2,22 m de sobrecarga) e 2ª Etapa (3,0 m de aterro), como a altura de aterro necessária, apresentada no item 2.1.1, deverá ser de 10,26 m, portanto foi considerada uma sobrecarga de 0,96 m.

O tempo para atingir 100% do recalque total para a situação sem sobrecarga (3,22 m) foi estimado em 10 meses, como mostrado na Tabela 4.12.

Tabela 4.12 - Recalques Totais.

t (meses)	ρ_{total} (m)
0,00	0,000
0,02	0,037
0,06	0,109
0,14	0,218
0,24	0,356
0,38	0,522
0,55	0,708
0,74	0,910
0,97	1,124
1,23	1,336
1,52	1,553
1,84	1,763
2,21	1,969
2,62	2,162
3,11	2,351
3,68	2,529
4,38	2,693
5,28	2,846
6,54	2,982
8,70	3,110
9,41	3,154
10,30	3,207

4.1.4 Recalques Secundários

Para o estudo do fenômeno da deformação das argilas duas teorias podem ser adotadas, uma em que o recalque devido ao adensamento secundário ocorre após o término do adensamento primário; e a segunda teoria é aquela que considera que o adensamento secundário ocorre simultaneamente com o adensamento primário.

Na realidade nenhuma das duas teorias reflete a realidade do problema (Martins *et al.* 1997). Entretanto, no caso de uso de drenos verticais, por exemplo, o tempo correspondente ao final do primário é em geral de 1 a 2 anos e o erro de se adotar a teoria que considera o secundário após o primário é considerado aceitável.

Para a presente estimativa do incremento de recalque devido ao adensamento secundário com o tempo, considerou-se que o mesmo ocorre após o final do adensamento primário.

Sendo adotado:

- $C_{\alpha} / C_c = 0,03$, onde
- C_{α} = coeficiente de adensamento secundário.

Os valores de recalque com o tempo podem ser estimados pela equação

$$\Delta h_{\text{sec}} = H \cdot C_{\alpha} \cdot \log(t / t_p)$$

onde,

- H = espessura da camada compressível;
- t_p = tempo correspondente a um grau de adensamento de 90% dos recalques primários;
- t = intervalo de tempo no qual se deseja determinar o recalque.

Admitiu-se que o fenômeno do adensamento secundário se inicia após o término do adensamento primário.

A partir dos valores de umidade (w) determinados a cada metro nos furos de sondagens realizados, foi obtido um valor médio e máximo de umidade para cada camada de argila.

O índice de vazios (e) foi estimado a partir da expressão:

$$S \cdot e = w \cdot G$$

Sendo

- S = grau de saturação, adotado S = 1.
- G = peso específico dos grãos, adotado G = 2,7.

Com o valor do índice de vazios, obteve-se o valor de C_c e com isso o do coeficiente de adensamento secundário C_{α} . Para uma umidade w = 64,6%, temos:

- e = 1,74;
- $C_c = 1,18 e$,
- $C_{\alpha} = 0,035$.

Os incrementos de recalque secundário com o tempo são apresentados na Tabela 4.13 a seguir.

Tabela 4.13 - Recalque Secundário x Tempo.

t (anos)	Δh_{sec} (m)
2	0,24
4	0,48
8	0,73
16	0,97
32	1,21

Os incrementos de recalques apresentados acima indicam a altura de pavimento que deverá ser reparada periodicamente.