



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

**LUIZA HELENA MAGALHÃES LEIROS**

**ESTIMATIVA DE RECALQUES EM ATERROS SOBRE  
SOLOS MOLES**

**NATAL-RN  
2017**



Luiza Helena Magalhães Leiros

Estimativa de recalques em aterros sobre solos moles

Trabalho de Conclusão de Curso na modalidade Monografia, submetido ao Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Norte como parte dos requisitos necessários para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Osvaldo de Freitas Neto

Natal-RN  
2017

Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN  
Sistema de Bibliotecas - SISBI  
Catalogação de Publicação na Fonte. UFRN - Biblioteca Central Zila Mamede

Leiros, Luiza Helena Magalhães.

Estimativa de recalques em aterros sobre solos moles / Luiza Helena Magalhães  
Leiros. - 2017.

107 f.: il.

Monografia (graduação) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro  
de Tecnologia, Curso de Engenharia Civil. Natal, RN, 2017.

Orientador: Prof. Dr. Osvaldo de Freitas Neto.

1. Engenharia civil - Monografia. 2. Recalque - Monografia. 3. Adensamento  
primário - Monografia. 4. Solos moles - Monografia. 5. Drenos verticais -  
Monografia. 6. Construção em etapas - Monografia. I. Freitas Neto, Osvaldo de. II.  
Título.

RN/UF/BCZM

CDU 624

Luiza Helena Magalhães Leiros

Estimativa de recalques em aterros sobre solos moles

Trabalho de conclusão de curso na modalidade Monografia, submetido ao Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Norte como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

**Aprovado em 22 de Novembro de 2017:**

---

Prof. Dr. Osvaldo de Freitas Neto - Orientador

---

Prof. Dr. Olavo Francisco dos Santos Junior - Examinador interno

---

Eng. Raymison Rodrigues Cardoso - Examinador externo

Natal-RN

2017

Àquela que me criou, educou, protegeu, deu amor incondicional e sempre esteve presente quando eu precisei: mãe.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao meu professor e orientador, Osvaldo de Freitas Neto, pela disponibilidade, paciência e suporte na orientação.

Ao meu namorado, Itajá Dantas de Souza Júnior, pela paciência, compreensão e pelos abraços que tanto aliviaram meus medos, além de toda diversão e companheirismo.

À minha mãe Suzana Correia Magalhães de Lima por me sustentar nos momentos de crise. À minha família, principalmente à minha tia, Maria Veralucia, e à minha prima, Cinthya Albert, que diversas vezes foram mães e amigas para mim. À minha tia Maria Valderes, e minha prima Hiana Abreu, pelos anos de educação, carinho e brincadeiras nas salas do “Centro Educacional de Natal” como também ao longo da vida. À Maria Valeria, e à também prima, Patricia Cocentino, pelas alegrias, gaiatices e apoio ao longo dos anos. Ao meu padrasto, André Luiz de Lima, que além de participar ativamente do meu crescimento me influenciando de tantas formas, foi também um exemplo de dedicação e superação.

Aos meus amigos, Johan Carlos, Allan Jeferson, Breno Pascoal, Vanderson Kleython, Juliana Araújo, Kelvin Kleyton, Matheus Natan, Ewerton Bezerra, Amanda Araújo, Ricardo Barros, Kevin Leite e Kaio Geovanne, pelas horas de conversa fiada na cantina, jogatinas, festas e diversões afins.

A todos os professores que participaram da minha formação, em especial ao professor Cicero Onofre que, apesar de não ter tido a chance de saber, me incentivou a permanecer no curso e a acreditar no potencial da engenharia para transformar a nossa sociedade.

## RESUMO

### ESTIMATIVA DE RECALQUES EM ATERROS SOBRE SOLOS MOLES

O recalque provocado por aterros sobre solos moles é um tema que vem preocupando os engenheiros geotécnicos ao longo dos anos devido à dificuldade de lidar com esse tipo de solo que costuma apresentar grandes deformações por adensamento e baixa capacidade de carga. Este trabalho realiza estimativas de recalque por meio de métodos analíticos e também com o uso de um programa computacional capaz de estimar recalques em 3 dimensões, SETTLE 3D<sup>®</sup>, avaliando os resultados obtidos por cada método. Para isso foram analisados dois aterros situados nas proximidades do Rio Sarapuí na Baixada Fluminense, no estado do Rio de Janeiro, cujos dados disponíveis para análise foram publicados por Ortigão (1980) e Terra (1988). Os aterros foram construídos visando principalmente o conhecimento do solo do local, que é uma argila mole, e estudar métodos de construção de aterros sobre solos moles. O primeiro aterro foi elevado até a sua ruptura e o segundo foi construído em etapas. O segundo aterro apresentava diferentes configurações para cada seção transversal, sendo algumas seções com drenos verticais de areia, geodrenos e outras sem drenos. Esses aterros foram instrumentados e os resultados obtidos pelas placas de recalque foram utilizados neste trabalho como base de comparação entre as estimativas de recalque dos métodos analíticos e computacionais.

**Palavras-chave:** recalque, adensamento primário, solos moles, drenos verticais, construção em etapas.



## **ABSTRACT**

### **SETTLEMENT ESTIMATIONS OF EMBANKMENTS OVER SOFT SOILS**

The settlement caused by embankments on soft soils is a subject that has been worrying geotechnical engineers over the years because of the difficulty to deal with this type of soil, which usually presents large deformations by settlement and a low bearing capacity. This paper makes estimations by analytical methods and by computational modeling in a 3D settlement analysis software, SETTLE 3D<sup>®</sup>, evaluating the results obtained by each method. For this, two embankments were analyzed localized near to Sarapuí River on Baixada Fluminense, in the state of Rio de Janeiro, whose available data were published by Ortigão (1980) and Terra (1988). The embankments were built mainly for obtaining information about the local soil, which is a soft clay, and for studying the construction methods of embankments over soft soils. The first embankment was elevated until failure and the second was constructed in stages. The second embankment presented different configurations to each cross section, which could be constructed with vertical drains, with geodrains or without any special drainage. These embankments were instrumented and the measurements of the settlement plates were used on this paper as a basis of comparison for the settlement estimations by analytical methods and the computational methods.

**Keywords:** Settlement, primary consolidation, soft soil, vertical drains, stage construction method.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Seção transversal utilizada na análise de estabilidade do aterro após sondagem tipo SPT. ....	23
Figura 2 - Soluções de estabilização ou controle de recalques de aterros sobre solos moles. .	24
Figura 3 - Comportamento do recalque para execução de aterro em etapas .....	25
Figura 4 - Comportamento do recalque para execução de aterro em etapas .....	25
Figura 5 - Uso de geodrenos em um aterro sobre solo mole. ....	26
Figura 6 - Representação da cravação do geodrenos: a) Descida do conjunto mandril-geodreno; b) Subida do mandril, fixação do geodrenos pela sapata de cravação. ....	27
Figura 7 - Analogia para demonstração do conceito de tensão efetiva. a) Esponja em repouso; b) peso aplicado; c) elevação de água. ....	28
Figura 8 - Bulbos de tensões para uma carga uniformemente distribuída no solo.....	29
Figura 9 - Representação gráfica dos parâmetros do método de Boussinesq.....	30
Figura 10 - Representação gráfica dos parâmetros geométricos .....	30
Figura 11 - Ábaco de Osterberg. ....	31
Figura 12 - Representação gráfica dos parâmetros geométricos usados no método do Espreadimento para um carregamento infinito em uma direção: a) vista em planta; b) vista em corte. ....	33
Figura 13 - Representação gráfica dos parâmetros geométricos usados no método do Espreadimento para carregamentos finitos nas duas direções: a) vista em planta; b) vista em corte. ....	34
Figura 14 - Curva típica de efeito de carregamento e descarregamento em ensaio edométrico de argila saturada. ....	36
Figura 15 - Curva Grau de Adensamento ( $U_z$ ) x Fator Tempo ( $T_z$ ).....	39
Figura 16 - Ábaco de $U_z$ em função do fator tempo e da profundidade .....	39
Figura 17 - Malha de Drenos: a) malha quadrada; b) malha triangular. ....	41
Figura 18 – Diâmetro equivalente do geodrenos.....	41
Figura 19 - Curva de construção do aterro com a consideração do tempo de construção.....	42
Figura 20 - Representação da construção de aterro em etapas: a) situação logo após a elevação da primeira etapa; b) situação logo após a elevação da segunda etapa; c) recalque x tempo considerando a construção em etapas. ....	44
Figura 21 – Localização dos aterros estudados. ....	45
Figura 22 - Posicionamento dos aterros estudados na região.....	46

Figura 23 - Vista superior do Aterro Experimental I.....	48
Figura 24 - Vista em corte da seção "A" do Aterro Experimental I.....	48
Figura 25 - Vista em corte da seção "B" do Aterro Experimental I.....	48
Figura 26 - Vista em corte da seção "C" do Aterro Experimental I.....	49
Figura 27 - Altura x tempo da Seção Principal do Aterro Experimental I (seção B).....	49
Figura 28 - Altura x tempo das Seções Secundárias do Aterro Experimental I (Seções A e C). .....	50
Figura 29 – Sequencia do desenvolvimento da ruptura do aterro. ....	51
Figura 30 - Vista superior do Aterro Experimental I após fissuramento.....	52
Figura 30 - Planta baixa do aterro experimental II com posicionamento das seções.....	52
Figura 31 - Corte AA' na seção "A" do Aterro Experimental II.....	53
Figura 32 - Corte AA' na seção "B" do Aterro Experimental II.....	53
Figura 33 - Corte AA' na seção "C" do Aterro Experimental II.....	53
Figura 34 - Corte AA' na seção "D" do Aterro Experimental II.....	53
Figura 35 - Corte AA' na seção "E" do Aterro Experimental II.....	53
Figura 36 - Corte AA' na seção "F" do Aterro Experimental II.....	54
Figura 37 - Corte AA' na seção "G" do Aterro Experimental II.....	54
Figura 38 - Variação de altura da seção A ao longo do tempo.....	55
Figura 39 - Variação de altura da seção B ao longo do tempo.....	56
Figura 40 - Variação de altura da seção C ao longo do tempo.....	56
Figura 41 - Variação de altura da seção D ao longo do tempo.....	57
Figura 42 - Variação de altura da seção E ao longo do tempo. ....	57
Figura 43 - Variação de altura da seção F ao longo do tempo. ....	58
Figura 44 - Variação de altura da seção G ao longo do tempo.....	58
Figura 45 - Instrumentação do aterro experimental II.....	59
Figura 46 - Seção transversal genérica utilizada para os cálculos.....	62
Figura 47 - Métodos de computação das tensões. ....	64
Figura 48 - Método de cálculo de recalques.....	64
Figura 49 - Curvas recalque x tempo do aterro I, seção A, calculadas por métodos analíticos. .....	66
Figura 50 - Curvas recalque x tempo do aterro I, seção B, calculadas por métodos analíticos. .....	67
Figura 51 - Curvas recalque x tempo do aterro I, seção C, calculadas por métodos analíticos. .....	67

Figura 53 – Superfície de ruptura do aterro.....	68
Figura 54 - Curvas recalque x tempo do aterro I, seção A, posição equivalente à placa de recalque PS-A1 estimadas por modelagem no SETTLE 3D® .....	69
Figura 55 - Curvas recalque x tempo do aterro I, seção A, posição equivalente à placa de recalque PS-A2 estimadas por modelagem no SETTLE 3D® .....	69
Figura 56 - Curvas recalque x tempo do aterro I, seção A, posição equivalente à placa de recalque PS-A3 estimadas por modelagem no SETTLE 3D® .....	70
Figura 57 - Curvas recalque x tempo do aterro I, seção B, posição equivalente à placa de recalque PS-B1 estimadas por modelagem no SETTLE 3D® .....	70
Figura 58 - Curvas recalque x tempo do aterro I, seção B, posição equivalente à placa de recalque PS-B2 estimadas por modelagem no SETTLE 3D® .....	71
Figura 59 - Curvas recalque x tempo do aterro I, seção B, posição equivalente à placa de recalque PS-B3 estimadas por modelagem no SETTLE 3D® .....	71
Figura 60 - Curvas recalque x tempo do aterro I, seção C, posição equivalente à placa de recalque PS-C1 estimadas por modelagem no SETTLE 3D® .....	72
Figura 61 - Curvas recalque x tempo do aterro I, seção C, posição equivalente à placa de recalque PS-C2 estimadas por modelagem no SETTLE 3D® .....	72
Figura 62 - Curvas recalque x tempo do aterro I, seção C, posição equivalente à placa de recalque PS-C3 estimadas por modelagem no SETTLE 3D® .....	73
Figura 63 – Recalques para os 29 dias da seção A.....	74
Figura 64 – Recalques para os 29 dias da seção B.....	74
Figura 65 – Recalques para os 29 dias da seção C.....	74
Figura 66 - Curvas recalque x tempo do aterro II, seção A, calculadas por métodos analíticos para $c_v = 20 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$ .....	75
Figura 67 - Curvas recalque x tempo do aterro II, seção A, calculadas por métodos analíticos para $c_v = 9,5 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$ (metodologia 1) e $c_v = 12 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$ (metodologia 2). .....	76
Figura 68 - Curvas recalque x tempo do aterro II, seção G, calculadas por métodos analíticos para $c_v = 20 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$ (fase 1) e $c_v = 10 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$ (fase 2). .....	76
Figura 69 - Curvas recalque x tempo do aterro II, seção G, calculadas por métodos analíticos para $c_v = 5,5 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$ (met. 1, fases 1 e 2), $c_v = 9 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$ (met. 2, fase 1) e $c_v = 6 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$ (met. 2, fase 2). .....	77
Figura 70 - Curvas recalque x tempo do aterro II, seção B, calculadas por métodos analíticos para $c_v = 6 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$ (fases 1 e 2). .....	77

Figura 71 - Curvas recalque x tempo do aterro II, seção C, calculadas por métodos analíticos para $c_v = 4 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$ (fase 1) e $c_v = 10 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$ (fase 2).	78
Figura 72 - Curvas recalque x tempo do aterro II, seção D, calculadas por métodos analíticos para $c_v = 6 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$ (fases 1 e 2).	78
Figura 73 - Curvas recalque x tempo do aterro II, seção E, calculadas por métodos analíticos para $c_v = 4,5 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$ (fase 1) e $c_v = 6 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$ (fase 2).	79
Figura 74 - Curvas recalque x tempo do aterro II, seção F, calculadas por métodos analíticos para $c_v = 4 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$ (fases 1 e 2).	79
Figura 75 - Curvas recalque x tempo do aterro II, seção A, calculadas por métodos computacionais para $c_v = 20 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$ .	80
Figura 76 - Curvas recalque x tempo do aterro II, seção B, calculadas por métodos computacionais para $c_v = 6 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$ .	81
Figura 77 - Curvas recalque x tempo do aterro II, seção C, calculadas por métodos computacionais para $c_v = 7 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$ .	81
Figura 78 - Curvas recalque x tempo do aterro II, seção D, calculadas por métodos computacionais para $c_v = 6 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$ .	82
Figura 79 - Curvas recalque x tempo do aterro II, seção E, calculadas por métodos computacionais para $c_v = 5,2 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$ .	82
Figura 80 - Curvas recalque x tempo do aterro II, seção F, calculadas por métodos computacionais para $c_v = 4 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$ .	83
Figura 81 - Curvas recalque x tempo do aterro II, seção G, calculadas por métodos computacionais para $c_v = 15 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$ .	83
Figura 82 – Recalques para os 1200 dias da seção A.	84
Figura 83 – Recalques para os 1200 dias da seção B.	84
Figura 84 – Recalques para os 1200 dias da seção C.	85
Figura 85 – Recalques para os 1200 dias da seção E.	85
Figura 86 – Recalques para os 1200 dias da seção E.	85
Figura 87 – Recalques para os 1200 dias da seção F.	86
Figura 88 – Recalques para os 1200 dias da seção G.	86

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Reservas brasileiras de turfa.....	22
Tabela 2 - Especificações construtivas e datas de execução dos aterros previstos para o programa de pesquisas “Construção de aterros sobre solos compressíveis”.....	46
Tabela 3 - Equações para obtenção de parâmetros do solo.....	47
Tabela 4 - Características do aterro II na primeira fase do carregamento.....	54
Tabela 5 - Características do aterro II na segunda fase do carregamento.....	55
Tabela 6 - Parâmetros do solo mole sob o aterro experimental I.....	59
Tabela 7 - Valores de $c_v$ admissíveis e adotados.....	61

## SIMBOLOGIA

SÍMBOLO	SIGNIFICADO
$\infty$	Infinito
$a$	Espessura do talude (seção 2.3.4), $a$ é a largura do geodreno (seção 2.4.2.3)
$B$	Comprimento do carregamento
$b$	Espessura do aterro (seção 2.3.4), $b$ é a espessura do geodreno (seção 2.4.2.3)
$C$	Curva real dos recalques
$C_c$	Índice de compressão
$C_d$	Índice de descompressão
$C_r$	Índice de recompressão
$C_1$	Curva obtida para um aterro construído instantaneamente no tempo $t=0$
$ch$	Coefficiente de adensamento horizontal
$CR$	Coefficiente de compressão
$cv$	Coefficiente de adensamento vertical
$d_e$	Diametro de influencia do dreno
$d_w$	Diametro do dreno ou diametro equivalente do geodreno
$e_0$	Índice de vazio inicial
$E_s$	Módulo de elasticidade do solo
$h$	Altura do aterro.
$H$ ou $h_{arg}$	Altura da camada de argila
$h_w$	Altura da camada de agua
$Hd$	Distancia de drenagem
$I$	Fator de influência
$L$	Largura do carregamento
$l$	Distancia entre drenos
$p$	Carregamento distribuído (seção 2.3.4), $p$ é a tensão durante o período construtivo (seção 2.4.2.4)
$p_1$	É a tensão aplicada ao final do carregamento (seção 2.4.2.4)
$Q$	Carga pontual
$r$	Distancia horizontal entre o ponto de aplicação da carga e o ponto onde se determina o acréscimo de tensão.
$R0$	Distancia entre o ponto considerado e o pé do talude
$R1$	Distancia entre o ponto considerado e a projeção da mudança de inclinação do aterro
$R2$	Distancia entre o ponto considerado e o fim do aterro
$S_c$	Recalque por adensamento primario
$S_e$	Recalque imediato ou eslatico
$S_s$	Recalque por adensamento secundario
$S_t$	Recalque total
$SR$	Coefficiente de recompressão
$t$	Tempo decorrido
$T_h$	Fator tempo horizontal
$T_v$	Fator tempo vertical
$t0$	Data de inicio da construção
$tf$	Data de final da construção

$U$	Grau de consolidação da curva C1 (seção 2.4.2.4)
$U'$	Grau de consolidação para a curva C (seção 2.4.2.4)
$U_v$	Grau de adensamento vertical
$U_{v,t}$	Grau de adensamento vertical para o tempo t.
$u_w$	Poropressão
$U_z$	Grau de adensamento horizontal
$x$	Distancia entre o eixo z e o ponto (seção 2.3.4), distancia horizontal entre a carga e o ponto considerado (demais seções)
$z$	Distancia entre o eixo x e o ponto (seção 2.3.4), profundidade (demais seções)
$z_{méd}$	Profundidade média da camada
$\alpha$	Angulo entre R0 e R1
$\beta$	Angulo entre R1 e R2 (seção 2.3.4), angulação de espraiamento (seção 2.3.6),
$\gamma_{arg}$	Peso específico argila (kn/m <sup>3</sup> )
$\gamma_{at}$	Peso específico do solo do aterro
$\gamma_{sat}$	É o peso específico saturado do solo
$\gamma_w$	Peso específico da agua
$\Delta H$	É o recalque devido sofrido pela camada
$\Delta H_t$	Recalque desenvolvido no tempo t
$\Delta t$	Tempo de construção (dias)
$\mu$	Coefficiente de Poisson
$\sigma$	Tensão na superficie do terreno devida ao carregamento (seção 2.3.6), tensão total (demais seções)
$\sigma'$	Tensão efetiva
$\sigma_0$	Tensão inicial
$\sigma'_a$	Tensão efetiva de sobreadensamento
$\sigma'_f$	Tensão efetiva final
$\sigma'_{v0}$	Tensão vertical efetiva l inicial



## ABREVIATURAS E SIGLAS

AL	Alagoas
BA	Bahia
BR	Brasil - Rodovia Federal
C.	Camada
Dez	Dezembro
DNER	Departamento Nacional De Estradas De Rodagem
ES	Espirito Santo
IPR	Instituto De Pesquisas Rodoviárias
LTDA	Limitada
MA	Maranhão
Nov	Novembro
NSPT	Número de golpes do SPT (Standard Penetration Test)
OCR	Over Consolidation Ratio
PE	Pernambuco
Prof F	Profundidade Final
Prof. I	Profundidade Inicial
RJ	Rio De Janeiro
RN	Rio Grande Do Norte
RS	Rio Grande Do Sul
RSA	Razão De Sobreadensamento
SC	Santa Catarina
SE	Sergipe
SP	São Paulo
Var	Variável

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	18
1.1	Considerações iniciais .....	18
1.2	Objetivos.....	19
1.2.1	Geral .....	19
1.2.2	Específicos.....	19
1.3	Justificativa.....	19
1.4	Estrutura do trabalho.....	20
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	21
2.1	Solos compressíveis ou solos moles .....	21
2.2	Aterros sobre solos moles .....	22
2.2.1	Métodos de construção de aterros sobre solos moles .....	23
2.3	Tensões no solo.....	27
2.3.1	Tensão total, tensão efetiva e pressão neutra.....	27
2.3.2	Bulbo de tensões .....	28
2.3.3	Cálculo das tensões pelo método de Boussinesq.....	29
2.3.4	Cálculo das tensões verticais para um carregamento de aterro .....	30
2.3.5	Cálculo das tensões pelo método de Westergaard.....	32
2.3.6	Cálculo das tensões pelo método do Espriamento.....	32
2.4	Recalques.....	34
2.4.1	Tipos de recalque.....	34
2.4.2	Cálculo dos recalques por adensamento primário.....	36
3	ATERROS ANALISADOS.....	45
3.1	Breve introdução aos aterros utilizados neste trabalho.....	45
3.2	Aterro Experimental I - Ortigão (1980).....	47
3.3	Aterro Experimental II - Terra (1988).....	52
4	METODOLOGIA .....	59
4.1	Parâmetros do solo mole.....	59
4.2	Métodos analíticos .....	61
4.2.1	Metodologia de cálculo de tensões .....	62
4.2.2	Metodologia de cálculo de recalques totais .....	62
4.2.3	Metodologia de cálculo de recalques no tempo.....	63
4.3	Programa SETTLE 3D <sup>®</sup> .....	63

4.3.1 Metodologia de cálculo de tensões .....	63
4.3.2 Metodologia de cálculo de recalques.....	64
5 RESULTADOS E ANÁLISES.....	66
5.1 Aterro Experimental I.....	66
5.1.1 Métodos analíticos:.....	66
5.1.2 SETTLE 3D®.....	68
5.1.3 Comparação entre métodos de cálculo bidimensional e tridimensional:.....	73
5.2 Aterro experimental II .....	75
5.2.1 Métodos analíticos .....	75
5.2.2 SETTLE 3D®.....	80
5.2.3 Comparação entre métodos de cálculo bidimensional e tridimensional:.....	84
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	87
7 REFERÊNCIAS.....	88
APÊNDICE A: CURVAS DO TRABALHO DE ORTIGÃO. ....	90
APÊNDICE B: PARÂMETROS DAS SEÇÕES DO ATERRO EXPERIMENTAL II.	95
APÊNDICE C: APLICAÇÃO DA FERRAMENTA SETTLE 3D® . ....	97

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Considerações iniciais

No projeto de um aterro, os dois principais condicionantes são a sua estabilidade e os recalques. A dificuldade de garantir a estabilidade e limitar os recalques aumenta quando o aterro é construído sobre solo mole, em parte devido à baixa resistência que esses solos costumam apresentar, em parte pela tendência de sofrerem grandes recalques que se desenvolvem no decorrer de longos períodos de tempo. A ocorrência de ruptura ou de recalques excessivos em um aterro incorrem altos gastos, podendo também causar a perda de vidas humanas, requerendo um cuidado maior do corpo técnico.

Os recalques em solos moles costumam ser majoritariamente causados por adensamento, que é o incremento da deformação do solo como resultado da saída de água do sistema, diminuindo o índice de vazios desse solo. No caso de adensamento primário, foco deste trabalho, isso ocorre devido à dissipação da poropressão provocada por um acréscimo de tensão no solo. Assim, a velocidade do adensamento depende da permeabilidade do solo, a qual costuma ser muito baixa em argilas.

Com o objetivo de acelerar o processo de adensamento ou garantir a estabilidade do aterro, alguns métodos foram desenvolvidos, como o uso de drenos verticais, que diminuem a distância de drenagem. Outro método muito utilizado é a construção do aterro em etapas, que garante a estabilidade do solo durante a construção de aterros cuja sobrecarga superaria a resistência do solo. Esses métodos, como vários outros citados no Capítulo 2, podem ser usados em conjunto para sobrepor seus efeitos e viabilizar a construção do aterro.

Além do adensamento primário, solos com muita matéria orgânica ou muito compressíveis podem apresentar altas taxas de adensamento após a dissipação da poropressão, fenômeno conhecido como adensamento secundário. Por fim, existe também o recalque imediato ou recalque elástico, que costuma ter mais importância em solos arenosos.

## 1.2 Objetivos

### 1.2.1 Geral

Analisar os resultados das estimativas de recalque de aterros executados sobre solos moles por métodos computacionais 3D e métodos analíticos consagrados pela literatura, com acesso a dados de recalque aferidos por instrumentações de campo publicados por Ortigão (1980) e Terra (1988).

### 1.2.2 Específicos

- Estimar os recalques de um aterro sobre solos moles utilizando métodos analíticos consagrados na literatura e métodos computacionais através do programa *SETTLE 3D*<sup>®</sup> versão 3.0 da Rocscience.
- Confrontar os resultados calculados com os resultados obtidos em campo.
- Interpretar os resultados realizando análise de recalques durante o processo de adensamento.

## 1.3 Justificativa

Um aspecto de interesse da engenharia civil é o comportamento dos solos moles, que há muito tempo vêm sendo um problema para os mais variados tipos de construção, desde edifícios até estradas e pontes. A atual expansão das cidades e necessidade cada vez maior de espaços para infraestrutura tornará inevitável a construção sobre solos que podem apresentar baixo desempenho geotécnico, como é o caso dos solos moles.

Segundo Ortigão (1980), a construção de aterros sobre esse tipo de solo costuma ser problemática e precisa atender a dois requisitos: apresentar fator de segurança adequado contra a ruptura e apresentar deformações ou recalques compatíveis com o tipo de obra. Seguir esses requisitos requer estimativas adequadas do comportamento do aterro.

Devido à grande gama de possibilidades de composições de solos e à complexidade da estimativa do seu comportamento, é importante o estudo de métodos que se aproximem ao máximo dos resultados reais de recalque e de capacidade de carga desses solos.

Seguindo esse raciocínio, este trabalho se justifica na necessidade de realizar a estimativa do recalque sobre solos moles nas obras de engenharia e no uso de métodos rigorosos e adequados para avaliar a qualidade dessa previsão.

Ademais, este trabalho contribui para a verificação do desempenho do software *SETTLE 3D*<sup>®</sup> a fim de usá-lo como uma opção viável de estimativa de recalques.

#### **1.4 Estrutura do trabalho**

Este trabalho foi desenvolvido em 6 (seis) capítulos. O Capítulo 1 (um) trata das considerações iniciais, objetivos do trabalho, justificativas e sua estrutura.

O Capítulo 2 (dois) é a revisão bibliográfica, que explica algumas teorias e metodologias como também alguns conceitos necessários para a compreensão deste trabalho.

No Capítulo 3 (três) são fornecidos detalhes sobre os aterros utilizados neste trabalho e cujos resultados de instrumentação serviram como base experimental para a comparação dos resultados obtidos.

No Capítulo 4 (quatro) são apresentados os procedimentos e parâmetros utilizados na realização dos cálculos de recalque e na modelagem computacional dos aterros utilizados.

No Capítulo 5 (cinco) são apresentados e analisados os resultados obtidos pelos métodos abordados no Capítulo 4 (quatro).

No Capítulo 6 (seis) são apresentadas as considerações finais do trabalho.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Solos compressíveis ou solos moles

Solos moles são solos sedimentares cujo índice de resistência à penetração ( $N_{SPT}$ ) é baixo, não superando 4 golpes. Apresentam geralmente alta compressibilidade, baixa permeabilidade e encontram-se saturados, sendo usualmente argilas moles ou areias argilosas muito fofas. São oriundas de corpos d'água que por algum motivo estabilizaram seu fluxo e permitiram a deposição do material fino.

Segundo Massad (2010), a deposição das argilas moles pode ser influenciada por condições como: velocidade das águas, a quantidade e a composição da matéria orgânica, a salinidade e a floculação de partículas, entre outros. As argilas moles podem ser distinguidas pelo meio, pelo processo, e pelo local de sua deposição.

Quando se trata do processo de deposição das argilas moles, Massad (2010) as divide em duas categorias: as argilas de formação fluvial, ou aluviões, e as argilas de formação marinha. As aluviões se formam da deposição dos sedimentos devido às cheias dos rios em regiões alagáveis, planícies de inundação ou várzeas. Os solos moles de origem marinha se formam pela deposição dos sedimentos em processos de aumento ou rebaixamento do nível do mar. Esses dois tipos de solo podem se sobrepor em regiões de laguna.

O autor menciona que a presença de matéria orgânica nos solos moles é muito comum, dando a eles uma coloração e cheiro específicos. Os solos moles de origem orgânica são normalmente chamados de turfas e costumam ter recalques por longos períodos mesmo após a estabilização da pressão neutra. Esse recalque se enquadra na definição de adensamento secundário, que será discutido na seção 2.4.1.3 “Recalque por adensamento secundário”.

No Brasil, segundo Franchi, Sígolo e Motta (2006), as turfas se desenvolveram em depressões originadas do fluxo dos rios e dos mares, como canais abandonados e lagoas marginais (lagos em formato de “u” que costumavam ser parte do rio) ou em planícies de inundação e planícies litorâneas, e lagunas ou embaiamentos. Quanto a isso, é possível ver a localização de alguns depósitos brasileiros de turfa no Tabela 1:

Tabela 1 - Reservas brasileiras de turfa.

Estado	Localidade	Estado	Localidade
MA	Pinheiro	AL	Rio Meirim
	Ilha Grande		Rio Pratagi
	Barreirinhas		Rio Manguaba
	Sobradinho		Lagoa Mundaú
	Carrapato-Fome		Porto Calvo
RN	Ceará-Mirim	SE	Santo Amaro de Brotas
	Rio Maxaranguape	SC	Balneário Arroio do Silva
	Punaú-Piranhas	RS	Águas Claras
	Rio Pium		Itapuã
	Trairi-Araráí		Barrocas
	Curimataú		Três Passos
	Goianinha-Jacu		Córrego Grande do Meio
Rio Guajú	ES	Vale do Paraíba	
PE	Itamaracá	SP	Rio Moji Guaçu
	Jaboatão-Cabo		Baixo Ribeira
	Ipojuca		Rio das Pontes
	Taberaba	BA	Barra dos Carvalhos
	Boa Vista - Pindobal		Iha de Tinharé
	Cravaçu - Caranguejeira		Faz. Monte Alegre
	Tavares - Tanques		Faz. Lagos
	Brejinho de Cima - Jaraguá		Vila Ouricana
	Camaratuba		Faz. Marobar
	Rio Miriri		
	Rio Paraíba		Alcobaça

Fonte: Adaptado de Franchi, Sígolo e Motta (2006).

## 2.2 Aterros sobre solos moles

A realização de aterros sobre solos moles requer alguns cuidados, principalmente quando se trata da resistência do solo e dos recalques. Segundo Massad, (2010) durante o período em que a camada de argila está adensando ela se torna cada vez mais rija, aumentando o fator de segurança relativo à ruptura do solo. Portanto, o problema de recalques é relevante principalmente durante os primeiros meses após a construção, até a argila adensar o suficiente para que seus recalques sejam aceitáveis do ponto de vista da obra a ser implantada.

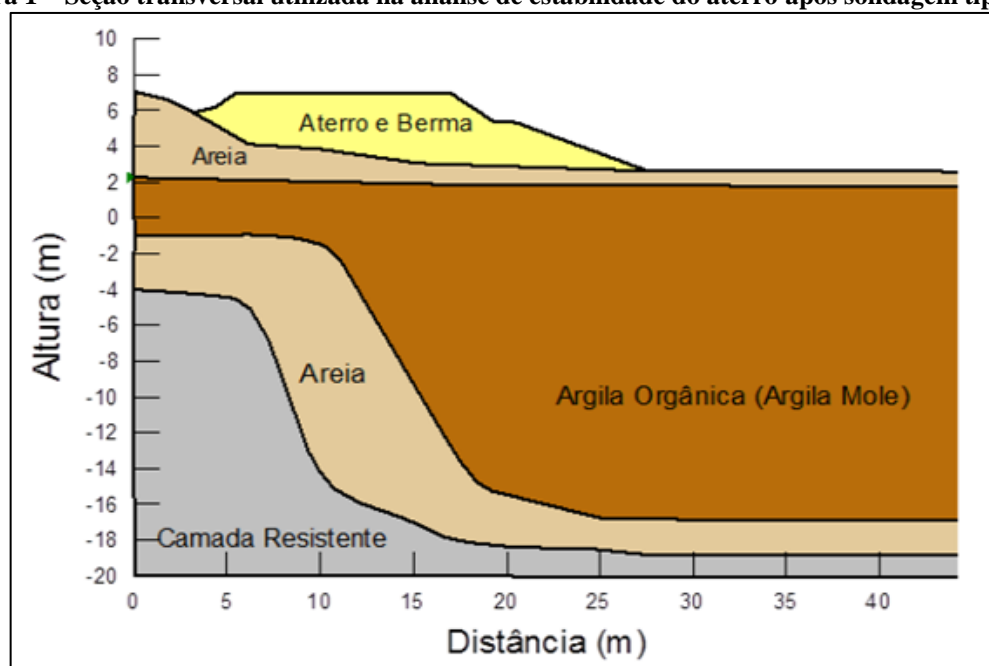
Nesse processo é importante respeitar a velocidade de adensamento, observando as tensões para não haver a ruptura não drenada do aterro. Além disso, é recomendado fazer o acompanhamento dos recalques mediante instrumentação adequada e análise dos parâmetros do solo através de ensaios, de forma a ter uma boa estimativa dos futuros recalques no tempo.



Também é muito importante uma boa investigação geotécnica, pois a falta de conhecimento do subsolo pode acarretar problemas como aconteceu num trecho da BR-101, estudado por Oliveira et al (2014). A partir de ensaio SPT no eixo do aterro se chegou ao perfil de argila com 4 m de profundidade que apresentava um fator de segurança à ruptura entre 1,15 e 1,2 (análise de estabilidade feita pelo método de Bishop e Fellenius, respectivamente), aceitável para o tipo do aterro e considerando que foi construído em etapas e era monitorado por instrumentação.

Porém, o aterro desenvolveu uma fissura de aproximadamente 90m de extensão. Realizadas novas sondagens, foi descoberto um perfil incomum de solo: ele apresentava, sob o eixo do aterro, argila orgânica mole com uma espessura de 7 m, enquanto no seu bordo direito a argila mole chegava a 21 m de profundidade, como mostrado na Figura 1.

**Figura 1 – Seção transversal utilizada na análise de estabilidade do aterro após sondagem tipo SPT.**



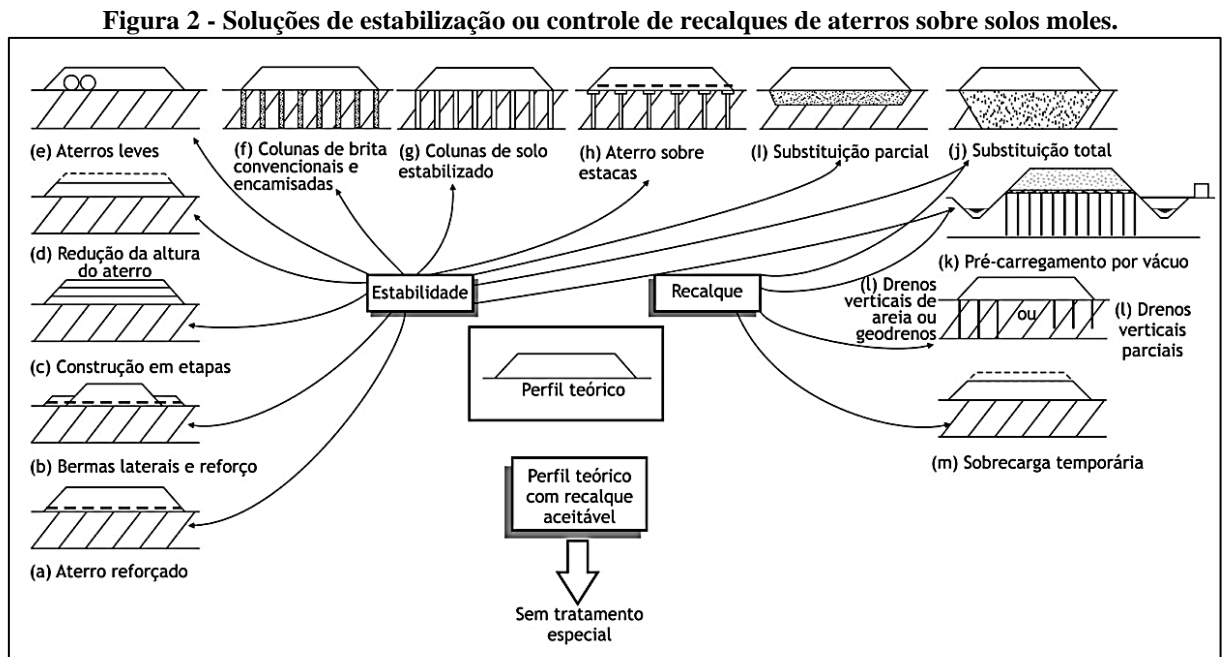
Fonte: Oliveira et al (2014).

Diante do novo perfil, foram realizadas novas análises de estabilidade que demonstraram que o aterro se encontrava na iminência de ruptura (fator de segurança igual a 1) mesmo sem execução de aterro com sobrecarga temporária prevista em projeto.

### 2.2.1 Métodos de construção de aterros sobre solos moles

Segundo Almeida e Marques (2010), se a resistência não drenada de um depósito de argila mole for muito baixa e a redução da altura do aterro não for viável, pode não ser possível realizar o aterro pelo método convencional. Para viabilizar a execução desses aterros, foram desenvolvidos diversos métodos construtivos que diminuem o tempo de execução do

aterro ou seu peso específico ou, ainda, aumentam a resistência do solo. Alguns desses métodos são: aterro estaqueado, aterro construído em etapas, sobrecarga temporária, substituição da camada de solo mole ou parte dela, uso de drenos verticais, construção de colunas verticais de areia ou brita, aterro de ponta, uso de bermas de equilíbrio e aterros leves. Estes e outros métodos são explicados por Almeida e Marques (2010) e ilustrados na Figura 2.



Fonte: Almeida e Marques, 2010, p. 32.

A escolha do método executivo dependerá, entre outros fatores, da disponibilidade dos materiais na região, do cronograma, do orçamento e da viabilidade técnica para a execução dos procedimentos.

Neste trabalho são explicados em detalhes os processos executivos apenas para aterro construído em etapas e aterros construídos com o uso de drenos verticais, pois são técnicas utilizadas nos aterros analisados.

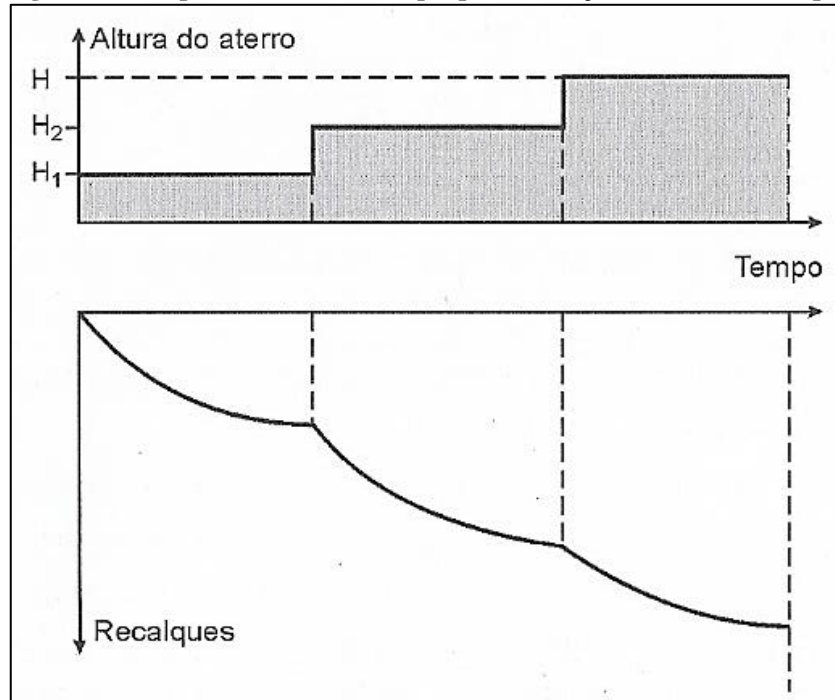
### 2.2.1.1 Construção por etapas

Quando se trata de um solo com baixa resistência não drenada a construção de um aterro em etapas pode ser uma solução viável; esse método consiste em dividir a construção do aterro previsto em etapas de forma que a argila ganhe resistência conforme adensa (ALMEIDA; MARQUES, 2010). A Figura 3 apresenta o desenvolvimento dos recalques ao longo do tempo num aterro executado em etapas.

Entretanto, pela necessidade de um tempo de espera para o ganho de resistência da argila, esse método de construção pode ser muito demorado, a depender da altura e da

permeabilidade da camada de argila mole considerada. Por isso esse método é muitas vezes associado à implantação de drenos verticais para agilizar o processo de consolidação.

**Figura 3 - Comportamento do recalque para execução de aterro em etapas**

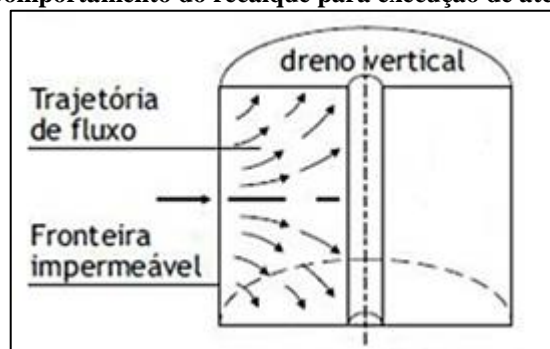


Fonte: Massad, 2010, p. 135.

#### 2.2.1.2 Drenos verticais

Os drenos verticais podem ser compostos por colunas de brita ou areia, que podem ser revestidas com geossintéticos para evitar a ocorrência de colmatação do dreno. A drenagem vertical também pode ser feita por geodrenos que, segundo Almeida e Marques (2010), são mais usados atualmente que colunas de brita e areia.

**Figura 4 - Comportamento do recalque para execução de aterro em etapas**

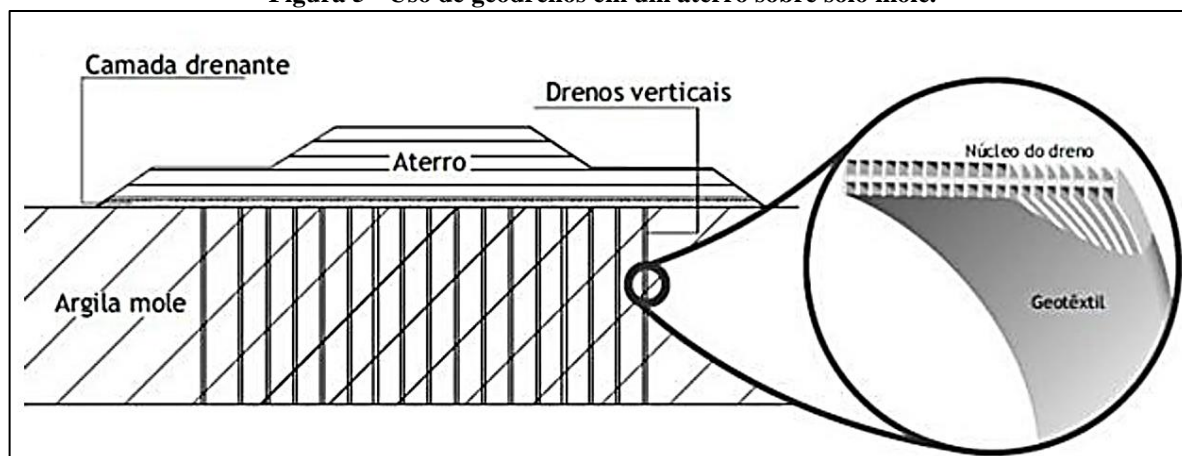


Fonte: Almeida e Marques, 2010.

A utilização de drenos acelera o processo de adensamento pelo encurtamento do caminho que a água precisa percorrer até chegar a uma camada de maior permeabilidade. A água é conduzida para os drenos pelo fluxo radial (horizontal, ver Figura 4), e de lá para a superfície do terreno. Por isso os drenos verticais são mais efetivos quando o coeficiente de

adensamento horizontal é maior que o coeficiente de adensamento vertical. Uma vista em corte de um aterro sobre geodrenos é encontrada na Figura 5.

**Figura 5 - Uso de geodrenos em um aterro sobre solo mole.**



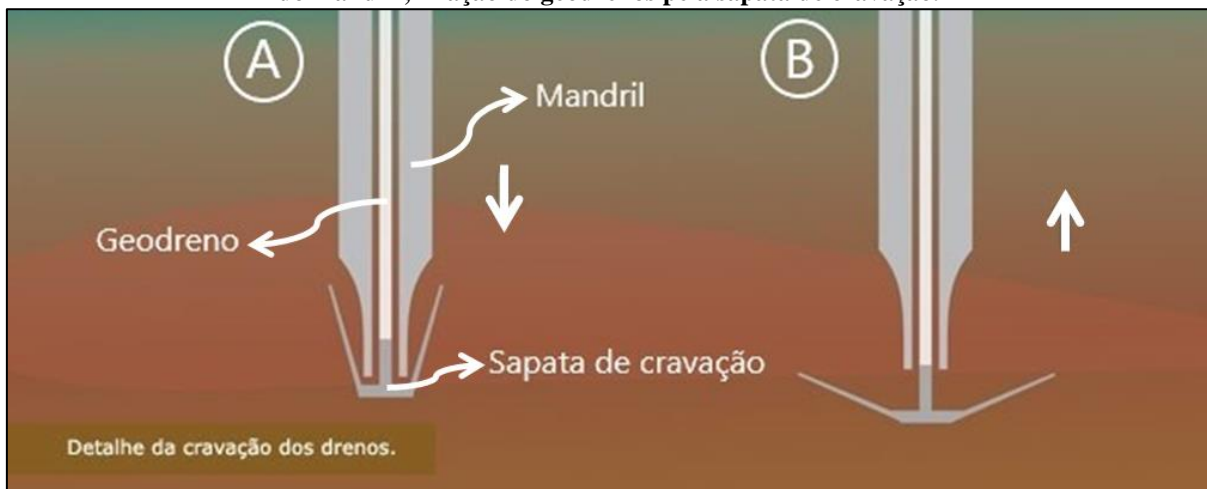
Fonte: Almeida e Marques, 2010, p. 39.

Sobre os drenos de areia, Massad (2010) comenta que a sua execução é feita com tubos metálicos, cravados até a profundidade de projeto; em seguida, é feita uma limpeza do interior do tubo através de jatos de água e então o tubo é preenchido com areia. Ele também comenta que é importante prever um colchão drenante nos casos de o material do aterro não ser permeável, garantindo o fluxo de água para fora do aterro.

Já os geodrenos são formados por um núcleo plástico com canaletas longitudinais e revestido por um geotêxtil não tecido para filtrar as partículas maiores. Sobre o processo de instalação dos geodrenos, Almeida e Marques (2010) explicam que inicialmente é executado um colchão drenante, que também funciona como aterro de conquista, e só depois são cravados os drenos. A cravação acontece por meio de uma haste metálica, denominada mandril, que também tem a função de proteger o geodrenos. Essa haste é associada a uma sapata de cravação que é deixada no solo para garantir a permanência do dreno depois da retirada do “braço” do equipamento (ver Figura 6).

Os drenos verticais são dispostos em malhas (quadradas ou triangulares) no terreno sobre o qual será implantado o aterro e devem estar a uma distância tal que os diâmetros de influência dos drenos não se sobreponham para não perderem eficiência. A respeito disso, o Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1998), afirma que os drenos devem se situar a uma distância mínima de 0,9 m para que o efeito de amolgamento do solo não interfira no funcionamento dos drenos.

**Figura 6 - Representação da cravação do geodrenos: a) Descida do conjunto mandril-geodreno; b) Subida do mandril, fixação do geodrenos pela sapata de cravação.**



Fonte: Adaptado de FUNDAÇÕES ESPECIAIS LTDA. 2009.

O amolgamento do solo, neste caso, pode ocorrer quando um dreno é cravado sem a retirada do material, compactando as laterais, como acontece na cravação dos geodrenos e na execução de drenos de areia com tubos de ponta fechada. Isso promove a perda da estrutura da argila, diminuindo a sua permeabilidade.

## 2.3 Tensões no solo

### 2.3.1 Tensão total, tensão efetiva e pressão neutra.

Segundo Pinto (2006), quando uma força é aplicada no solo, ela é transmitida de partícula a partícula pelo contato entre elas ou pela água presente nos vazios do solo. Porém, desenvolver um modelo matemático que considere todas essas forças é inviável. Utiliza-se então o conceito de tensão, que se mostra mais fácil de trabalhar.

A tensão é o quociente entre a força (ou a somatória das forças) pela área onde é aplicada. Quando se considera um maciço de solo é preciso avaliar as tensões devidas ao peso próprio do solo, que podem ser calculadas simplificadamente pelo produto entre o peso específico do solo e a profundidade para a qual a tensão está sendo calculada.

Quando trata-se de uma camada de solo com presença de nível d'água, considera-se que as partículas de água não sofrem variações volumétricas. Sendo assim, quando submetida a uma tensão, a água presente nos poros do solo tende a empurrar as partículas ao seu redor em todas as direções. Isso é o que os geotécnicos chamam de pressão neutra ou poropressão. Essa poropressão é responsável por absorver parte da tensão aplicada no solo, diminuindo a tensão que efetivamente é transferida pelas partículas do solo, a tensão efetiva. Isso significa que as partículas de solo vão se deslocar menos e, portanto, haverá menos deformações no maciço.

Segundo Terzaghi (1943, p. 12), a tensão total no solo pode ser dada pela soma da poropressão e da tensão efetiva, que podem ser calculadas pelas Equações 1 e 2, respectivamente.

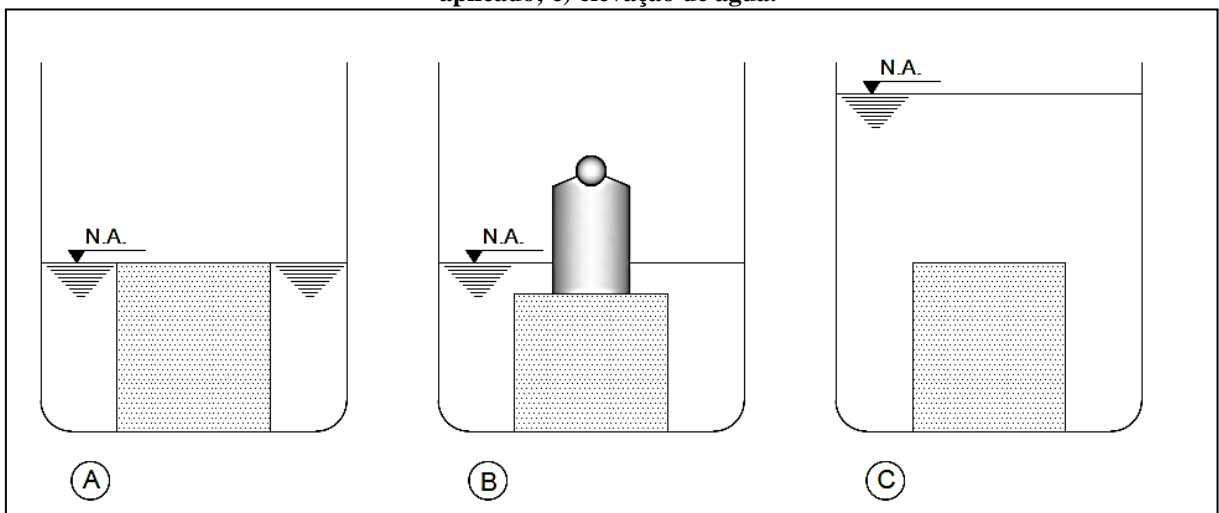
$$u_w = h_w \cdot \gamma_w \quad (1)$$

$$\sigma' = \sigma + u_w \quad (2)$$

Essa equação parte do princípio das tensões efetivas de Terzaghi que afirma que qualquer efeito mensurável devido à variação de tensões no solo é causado somente devido às variações da tensão efetiva.

Na Figura 7, tem-se a representação de uma analogia utilizada por Pinto (2006) para demonstrar esses conceitos. Na situação “a” a esponja se encontra em repouso. Quando é aplicado um peso sobre a esponja, ela se deforma; isso não acontece, no entanto, se o mesmo peso de água for adicionado sobre ela, pois a tensão efetiva, transferida entre as partículas sólidas, produz deslocamentos, enquanto a pressão neutra, transmitida pela água, ocorre em todas as direções sem produzir deslocamentos.

**Figura 7 - Analogia para demonstração do conceito de tensão efetiva. a) Esponja em repouso; b) peso aplicado; c) elevação de água.**



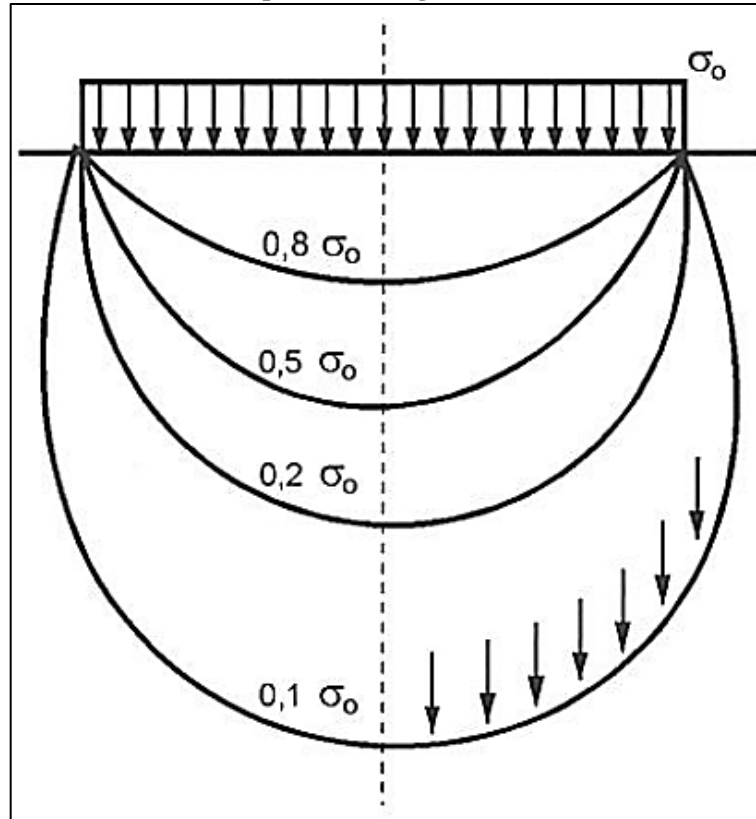
Fonte: Adaptado de Pinto, 2006, p. 99.

### 2.3.2 Bulbo de tensões

Quando se aplica uma carga sobre solo, a distribuição de tensões em relação à profundidade não varia de forma linear. Na realidade, a tensão do carregamento se propaga no solo para as laterais e diminui sua intensidade com a profundidade, pois fica distribuída em uma área maior. Como Pinto (2006) explica, o bulbo de tensões, ilustrado na Figura 8, é uma

linha onde há um mesmo percentual de acréscimo de tensão. Essa linha, se considerada num plano tridimensional, se torna uma superfície.

**Figura 8 - Bulbos de tensões para uma carga uniformemente distribuída no solo**



Fonte: Pinto, 2006, p. 164.

### 2.3.3 Cálculo das tensões pelo método de Boussinesq

De acordo com Pinto (2006), Boussinesq determinou as tensões no interior do solo, considerando-o elástico, homogêneo e isotrópico para uma carga pontual e carregamento infinito, seguindo a Equação 3:

$$\sigma_v = \frac{3 \cdot z^3}{2 \cdot \pi \cdot (r^2 + z^2)^{\frac{5}{2}}} \cdot Q \quad (3)$$

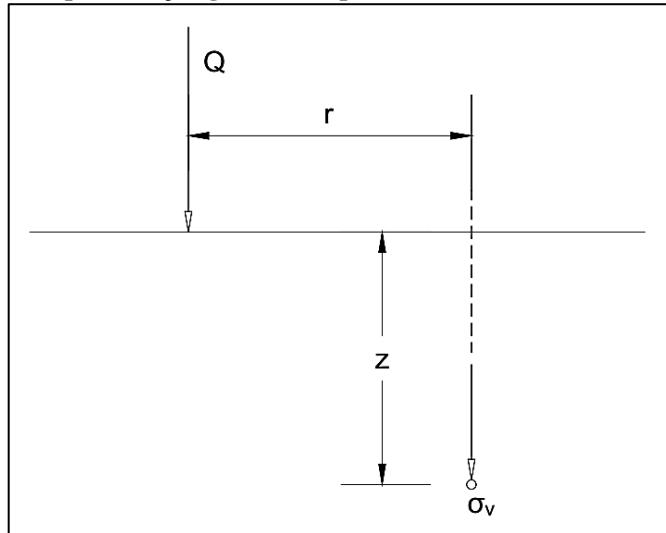
Onde  $Q$  é a intensidade da carga pontual;

$z$  é a distância vertical entre o ponto de aplicação da carga e o ponto onde se determina o acréscimo de tensão;

$r$  é a distância horizontal entre o ponto de aplicação da carga e o ponto onde se determina o acréscimo de tensão.

Esse método se limita à consideração de um carregamento pontual, que em geral não é uma situação corrente nas intervenções de engenharia. Os parâmetros da Equação 3 são ilustrados na Figura 9.

**Figura 9 - Representação gráfica dos parâmetros do método de Boussinesq.**



Fonte: Adaptado de Pinto, 2006, p. 166.

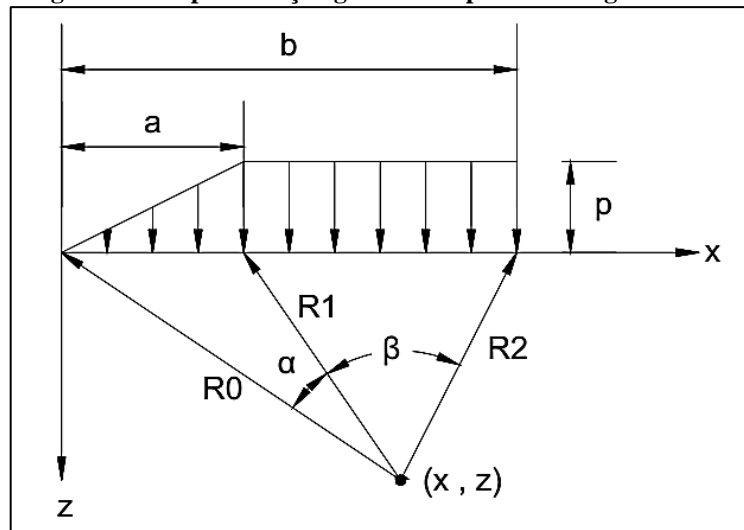
#### 2.3.4 Cálculo das tensões verticais para um carregamento de aterro

Poulos e Davis (1974) consideram que o acréscimo da tensão vertical devido a uma parcela de um aterro (ver Figura 4) obedece a seguinte expressão:

$$\sigma_z = \frac{p}{\pi} \cdot \left[ \beta + \frac{x\alpha}{a} - \frac{z}{R_2^2} \cdot (x - b) \right] \quad (4)$$

Sendo os parâmetros da Equação 4 obtidos conforme a Figura 10. As distâncias são tomadas em metros e os ângulos em radianos.

**Figura 10 - Representação gráfica dos parâmetros geométricos**



Fonte: Adaptado de Poulos e Davis, 1974, p. 40.



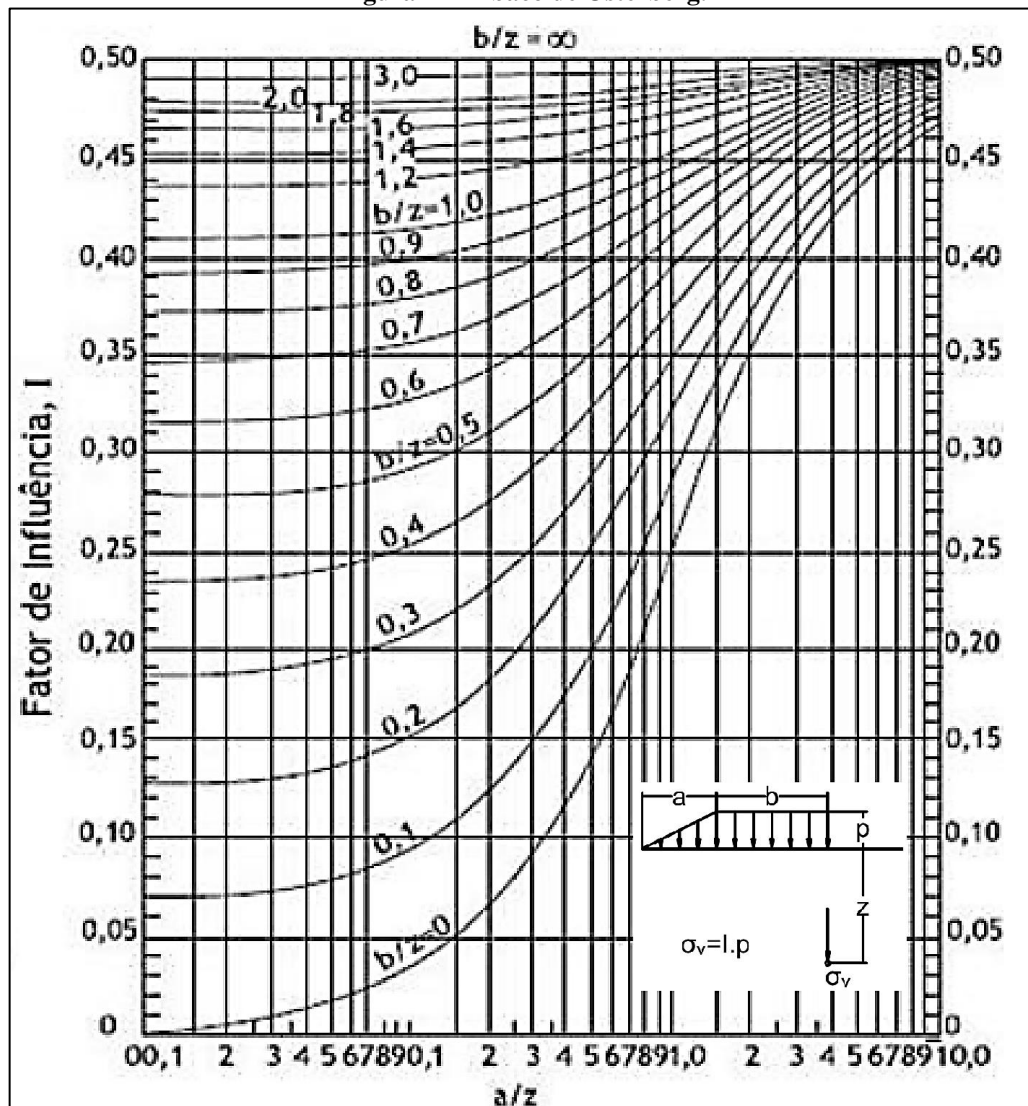
Para uma situação em que  $b = x$ , ou seja, tensão calculada para o centro do aterro, tem-se a simplificação apresentada na Equação 5, e para uma situação de um aterro simétrico e com “b” igual à metade da largura do aterro, tem-se a Equação 6:

$$\sigma_z = \frac{p}{\pi} \cdot \left[ \beta + \frac{x\alpha}{a} \right] \quad (5)$$

$$\sigma_z = 2 \cdot \frac{p}{\pi} \cdot \left[ \beta + \frac{x\alpha}{a} \right] \quad (6)$$

Para a simplificação dos cálculos é possível utilizar um ábaco proposto por Osterberg (1957, apud POULOS; DAVIS, 1974, p. 40), que usa um fator de influência I (ver Figura 11).

Figura 11 - Ábaco de Osterberg.



Fonte: Adaptado de Osterberg, 1957, apud Poulos e Davis, 1974, p. 40.

### 2.3.5 Cálculo das tensões pelo método de Westergaard

A solução de Westergaard (1938 apud Barata, 1984, p. 98), apresentada na Equação 7, consiste em aplicar a Teoria da Elasticidade para um solo formado por várias camadas horizontais, muito finas e juntas, com grande resistência a deformação horizontal. De acordo com Taylor (1948, apud Barata, 1984, p. 98), essa situação se aproxima mais da situação real para camadas de argila, as quais costumam apresentar lentes de outros solos.

Barata (1984) apresenta a Equação de Westergaard pela Equação 7:

$$\sigma_z = \frac{C \cdot Q}{2 \cdot \pi \cdot z^2} \cdot \left[ \frac{1}{C^2 + \left(\frac{x}{z}\right)^2} \right]^{\frac{3}{2}} \quad (7)$$

Onde  $C$  é calculado pela Equação 8;

$Q$  é a carga pontual considerada;

$z$  é a profundidade do ponto considerado;

$x$  é distância horizontal entre a carga e o ponto considerado.

$$C = \sqrt{\frac{1 - 2\mu}{2 - 2\mu}} \quad (8)$$

Onde  $\mu$  é o coeficiente de Poisson do solo estudado, com o qual se estima a deformação horizontal do solo. Para  $\mu = 0$ , pode-se escrever a Equação 7 simplificada na forma da Equação 9:

$$\sigma_z = \frac{Q}{\pi \cdot z^2} \cdot \left[ \frac{1}{1 + 2 \cdot \left(\frac{x}{z}\right)^2} \right]^{\frac{3}{2}} \quad (9)$$

### 2.3.6 Cálculo das tensões pelo método do Espriamento

O método do espraimento considera que as tensões aplicadas no solo se distribuem sobre áreas crescentes e que sempre se mantêm uniformemente distribuídas com a profundidade. Para Pinto (2006), as tensões se propagam de acordo com a área carregada (retangular, circular, etc). A tensão, para uma faixa de carregamento de comprimento infinito numa determinada profundidade, pode ser calculada pela Equação 10, descrita por Pinto (2006).

(10)

$$\sigma_v = \frac{L \cdot \sigma}{L + z \cdot \operatorname{tg} \beta}$$

Onde  $L$  é a largura do carregamento;

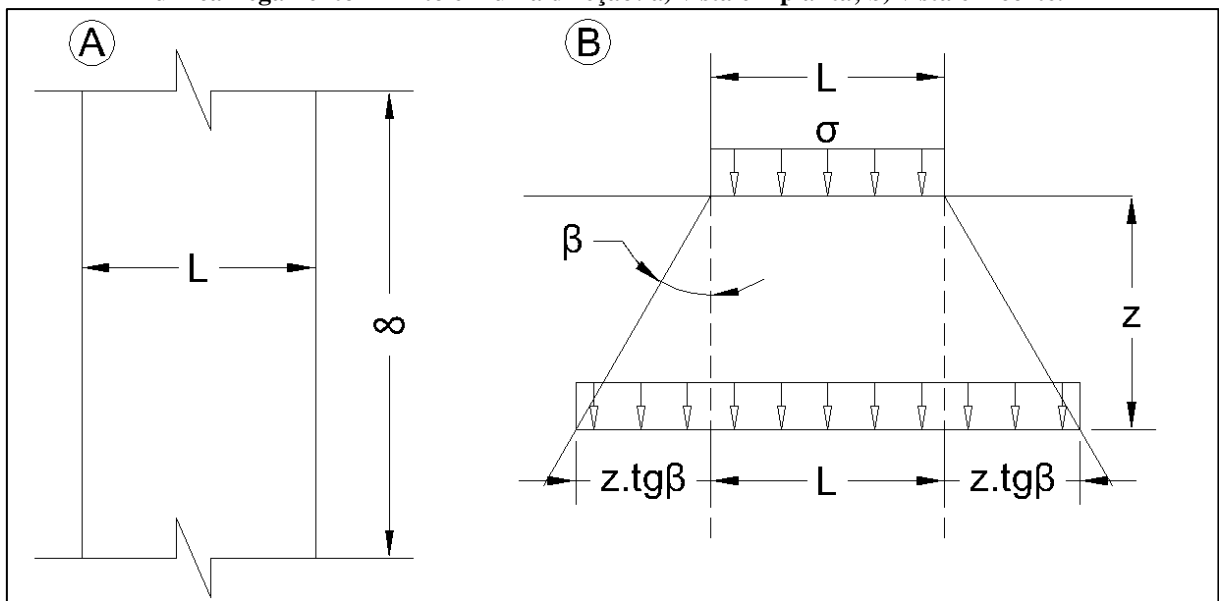
$z$  é a profundidade da camada cuja tensão se deseja calcular;

$\beta$  é a angulação de espraio adotada e;

$\sigma$  é a tensão na superfície do terreno devido ao carregamento.

A Figura 12, representa graficamente os termos da Equação 10.

**Figura 12 - Representação gráfica dos parâmetros geométricos usados no método do Espraio para um carregamento infinito em uma direção: a) vista em planta; b) vista em corte.**



Fonte: Adaptado de Pinto, 2006, p. 164.

Se for considerada uma área finita, pode-se usar a Equação 11:

$$\sigma_v = \frac{\sigma}{(B + 2 \cdot z \cdot \operatorname{tg} \beta) \cdot (L + 2 \cdot z \cdot \operatorname{tg} \beta)} \quad (11)$$

Onde  $L$  é a largura do carregamento;

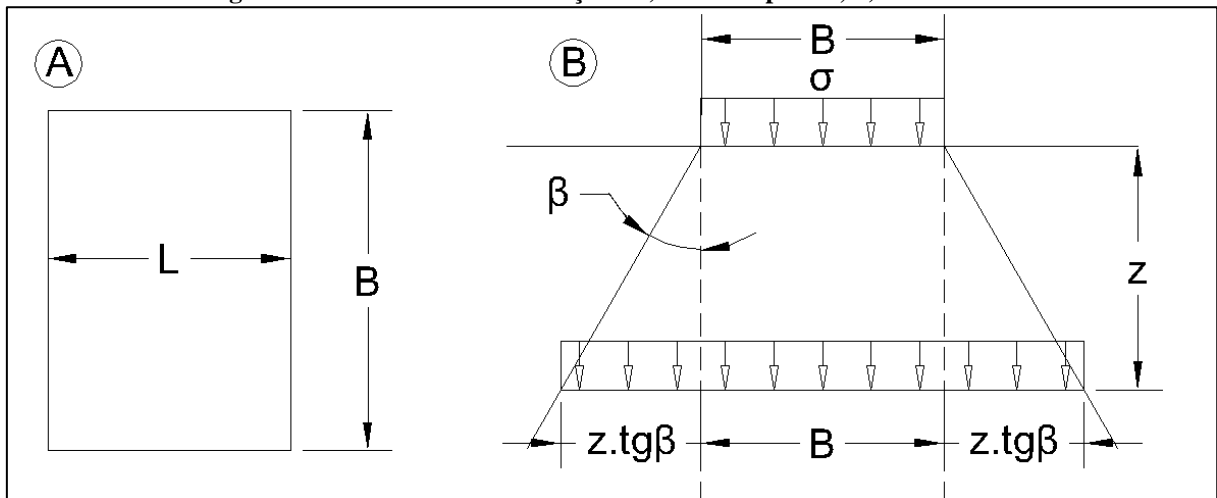
$z$  é a profundidade da camada cuja tensão se deseja calcular;

$\beta$  é a angulação de espraio adotada e;

$\sigma$  é a tensão na superfície do terreno devido ao carregamento.

Os termos da Equação 11 são ilustrados na Figura 13.

**Figura 13 - Representação gráfica dos parâmetros geométricos usados no método do Espreadimento para carregamentos finitos nas duas direções: a) vista em planta; b) vista em corte.**



Fonte: Adaptado de Rocscience, 2009.

## 2.4 Recalques

### 2.4.1 Tipos de recalque

Recalques são deformações no solo quando este é submetido a uma carga. Os recalques não previstos acarretam danos às estruturas envolvidas e conseqüentemente grandes gastos monetários, e se forem considerados aterros para pavimentação de rodovias, por exemplo, tem-se também o risco de perda de vidas humanas, dados os possíveis batentes ou desníveis provocados pelos recalques.

Quando se trabalha com recalque de solos, é importante notar que cada solo se comportará de uma maneira diferente, dependendo da sua composição, de suas propriedades, e das tensões sobre ele aplicadas. Segundo Das (2011), os recalques podem ser classificados em 3 (três) tipos de acordo com o processo que os origina, sendo o recalque total calculado pela soma dos três, conforme a Equação 12.

$$S_T = S_c + S_s + S_e \quad (12)$$

Onde  $S_c$ ,  $S_s$  e  $S_e$  são respectivamente o recalque por adensamento primário, o recalque por adensamento secundário e o recalque imediato ou recalque elástico. Esses recalques são detalhados abaixo.

#### 2.4.1.1 Recalque imediato

Segundo Das (2011, p. 244), o recalque imediato, também conhecido como recalque elástico, é causado pela deformação elástica do solo, não ocorrendo qualquer variação no teor de umidade deste. Ocorre pela acomodação das partículas, quando submetidas a

carregamento, e em tempos muito curtos em comparação aos outros recalques. Das (2011) complementa que as equações para a determinação do recalque imediato são baseadas na teoria da elasticidade.

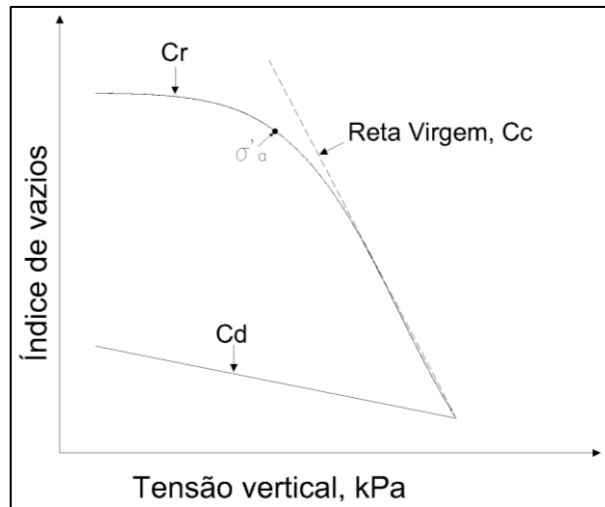
#### 2.4.1.2 Recalque por adensamento primário

O recalque por adensamento primário ocorre quando um solo compressível, geralmente uma argila saturada, é submetido a uma tensão. Inicialmente a tensão aplicada eleva a pressão neutra, o que ocasiona a expulsão de água dos poros do solo e a gradual elevação da tensão efetiva enquanto a poropressão se dissipa. Com a saída de água do interior do solo há a diminuição do índice de vazios, diminuindo o volume do solo e aumentando sua rigidez. O recalque por adensamento primário costuma ser demorado devido à baixa permeabilidade dos solos nos quais ocorre.

Para o estudo do adensamento primário, é necessário conhecer alguns parâmetros do solo. Um desses é a tensão de pré-adensamento, que é a tensão máxima à qual o solo já foi submetido desde a sua formação. A razão de sobreadensamento (RSA, em português, ou OCR, em inglês) é a relação entre a tensão de pré-adensamento ( $\sigma'_a$ ) e a tensão inicial no solo. Esses parâmetros podem ser obtidos através da curva de adensamento do ensaio edométrico, de onde são obtidas também as inclinações das curvas de compressão, recompressão e descompressão. A curva de recompressão é a aquela que se estende até a maior tensão à qual o solo já foi submetido no passado, a tensão de sobreadensamento ou pré-adensamento do solo. Já a curva de compressão, ou reta virgem, é a curva cujas tensões nunca foram antes suportadas por aquele solo. E a curva de descompressão se trata da curva obtida com o descarregamento desse solo. Essas inclinações são respectivamente  $C_r$ ,  $C_c$  e  $C_d$ . Um exemplo da curva obtida num ensaio edométrico pode ser encontrado na Figura 14. Estes parâmetros são empregados nas equações utilizadas para a determinação do recalque por adensamento primário.

A deformação do solo, quando submetido a uma tensão, depende do seu estado de tensões atual, bem como o seu histórico de tensões. Assim, tem-se três classificações para um solo submetido a um aumento de tensão efetiva. O solo normalmente adensado é aquele cuja tensão inicial no solo é igual à tensão de sobreadensamento. Caso a tensão de pré-adensamento supere a tensão efetiva, o solo é considerado sobreadensado. Uma terceira possibilidade que pode acontecer esporadicamente é se a tensão efetiva for superior à tensão de pré-adensamento, onde o solo se encontra em processo de adensamento. (PINTO, 2006, p. 191-192)

**Figura 14 - Curva típica de efeito de carregamento e descarregamento em ensaio edométrico de argila saturada.**



Fonte: Autor.

#### 2.4.1.3 Recalque por adensamento secundário

O recalque por adensamento secundário é observado posteriormente à dissipação da pressão neutra, ou seja, após o adensamento primário. Segundo Das (2011, p. 244), o “Recalque por compressão secundária, observado em solos coesivos saturados e resultado do ajuste plástico do tecido do solo. É uma forma adicional de compressão que ocorre sob tensão efetiva constante.” Esse processo costuma ser tão lento quanto o adensamento primário, e, segundo Das (2011, p. 271), chega a ser mais importante que este quando se tratam de solos orgânicos e inorgânicos altamente compressíveis mas possui menor significância em argilas inorgânicas sobreadensadas, onde o índice de compressão secundária é muito pequeno.

#### 2.4.2 Cálculo dos recalques por adensamento primário.

Como foco deste trabalho, os métodos de cálculo empregados nesse trabalho serão descritos a seguir.

##### 2.4.2.1 Método de cálculo dos recalques totais para uma dada seção de solo

O recalque apresentado por um solo depende principalmente da condição de tensões inicial e dos parâmetros desse solo. Quando é realizado um ensaio edométrico, obtêm-se os parâmetros de compressibilidade do solo como  $C_c$  (índice de compressão),  $C_r$  (índice de recompressão),  $C_d$  (índice de descompressão),  $e_0$  (índice de vazios inicial),  $\sigma'_a$  (tensão efetiva de sobreadensamento). Os ensaios de caracterização da amostra fornecem os outros parâmetros necessários.

Obtidos esses parâmetros, pode-se calcular o recalque total para a condição inicial de solo normalmente adensado pela Equação 13. Para um solo sobreadensado cuja tensão final não supera a tensão de sobreadensamento tem-se a Equação 14 e para um solo sobreadensado cuja tensão final supera a tensão de sobreadensamento tem-se a Equação 15 (PINTO,2006).

$$\Delta H = \frac{Cc}{(1 - e_i)} \cdot \log \left( \frac{\sigma'_f}{\sigma'_a} \right) \cdot H \quad (13)$$

$$\Delta H = \frac{Cr}{(1 - e_i)} \cdot \log \left( \frac{\sigma'_f}{\sigma'_{v0}} \right) \cdot H \quad (14)$$

$$\Delta H = \frac{Cr}{(1 - e_i)} \cdot \log \left( \frac{\sigma'_a}{\sigma'_{v0}} \right) \cdot H + \frac{Cc}{(1 - e_i)} \cdot \log \left( \frac{\sigma'_f}{\sigma'_a} \right) \cdot H \quad (15)$$

Onde  $\Delta H$  é o recalque devido sofrido pela camada;

$Cc$  é o índice de compressão;

$Cr$  é o índice de recompressão;

$e_i$  é o índice de vazios inicial do solo;

$\sigma'_f$  é a tensão final no centro da camada de argila, ou  $\sigma'_f = \sigma'_{v0} + \Delta\sigma'$ ;

$\sigma'_a$  é a tensão de sobreadensamento no centro da camada de argila;

$\sigma'_{v0}$  é a tensão inicial no centro da camada de argila;

$H$  é a altura da camada de argila.

#### 2.4.2.2 Estimativa da velocidade de desenvolvimento dos recalques verticais.

Tão importante quanto determinar os recalques é avaliar a velocidade com a qual eles acontecerão. Para isso, Terzaghi (1943, p. 266) desenvolveu uma teoria que explica o processo de adensamento, conhecida por Teoria do Adensamento de Terzaghi. Ela se baseia em algumas hipóteses:

- 1) Os vazios do solo estão completamente preenchidos por água;
- 2) A água e os constituintes sólidos do solo são perfeitamente incompressíveis;
- 3) A lei de Darcy é completamente válida;
- 4) O coeficiente de permeabilidade  $k$  é constante;
- 5) O tempo de consolidação se deve somente à baixa permeabilidade do solo;
- 6) A argila está lateralmente confinada;

7) A tensão total e a tensão efetiva são constantes em todos os pontos de qualquer seção horizontal que atravesse a camada de argila e para todos os estágios de consolidação;

8) A variação no índice de vazios é linear com o aumento da tensão efetiva no processo de adensamento.

A teoria de Terzaghi aponta que o recalque para um tempo  $t$  qualquer pode ser obtido pelo produto entre grau de adensamento  $U_z$  (calculado para um tempo  $t$ ) e o recalque total previsto (equação 16).

$$\Delta H_t = \Delta H \cdot U_{z,t} \quad (16)$$

Onde  $\Delta H_t$  é o recalque desenvolvido no tempo  $t$ ;

$\Delta H$  é o recalque total da camada de solo (ver 2.4.2.1);

$U_{z,t}$  é o grau de adensamento para o tempo  $t$ .

O grau de adensamento  $U_z$  pode ser relacionado ao fator tempo  $T_v$  a partir das Equações 17 e 18, e é possível ver essa relação no Figura 15. Alternativamente,  $U_z$  pode ser obtido pela Figura 16.

$$T_v = \frac{\pi}{4} \cdot U_v^2 \quad (17)$$

Para  $U_v \leq 0,526$ ;

$$T_v = -0,085 - 0,933 \cdot \log(1 - U_v) \quad (18)$$

Para  $U_v > 0,526$ .

$T_v$  é calculado pela Equação 19.

$$T_v = \frac{c_v}{H_d^2} \cdot t \quad (19)$$

Onde  $T_v$  é o fator tempo;

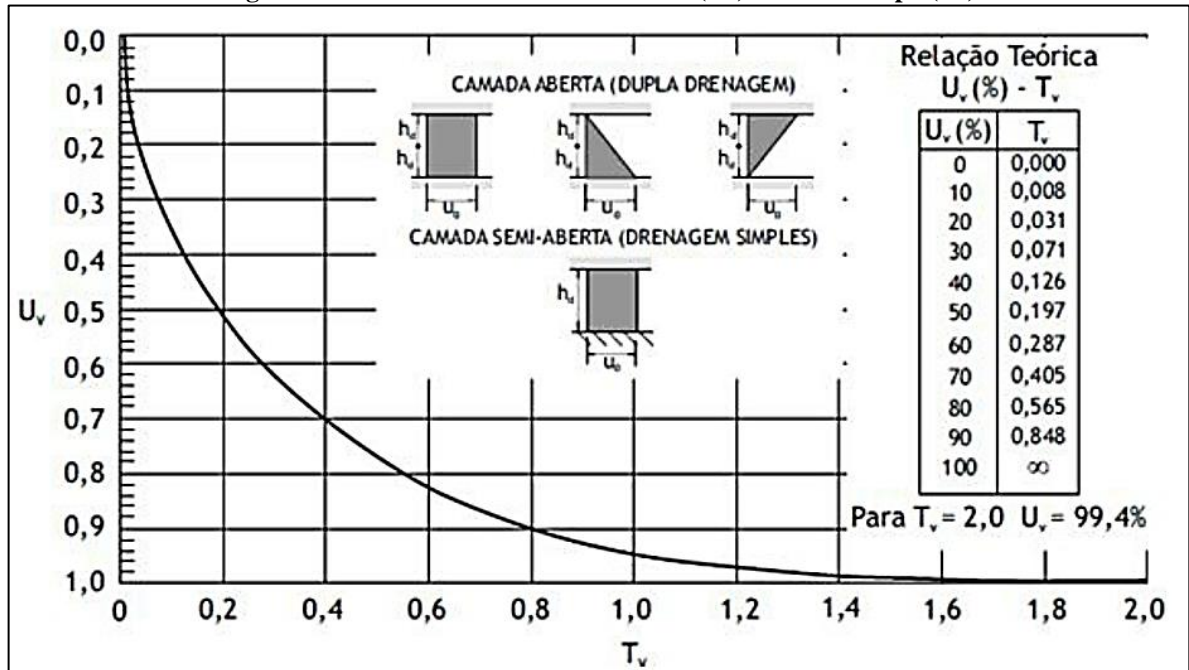
$c_v$  é o coeficiente de adensamento, que pode ser obtido no ensaio de adensamento;

$H_d$  é a maior distância que a água percorrer para ser drenada (Figura 15)

$t$  é o tempo que se deseja calcular o recalque.

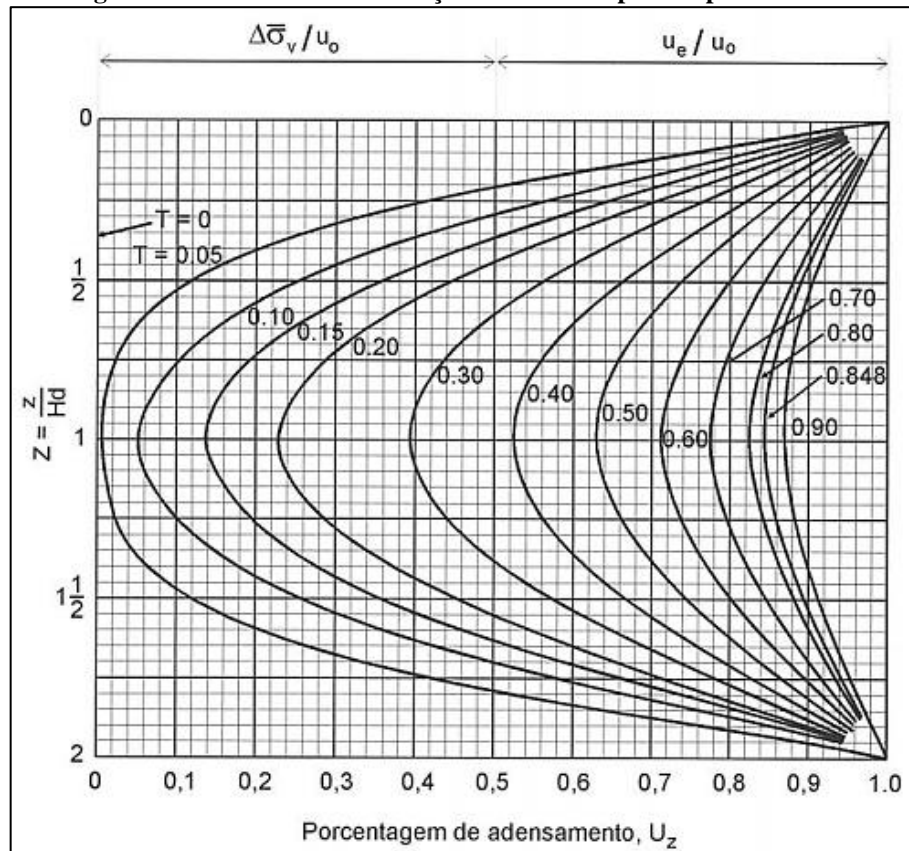


Figura 15 - Curva Grau de Adensamento ( $U_z$ ) x Fator Tempo ( $T_z$ )



Fonte: Almeida e Marques, 2010, p. 88.

Figura 16 - Ábaco de  $U_z$  em função do fator tempo e da profundidade



Fonte: Pinto, 2006, p. 213.

### 2.4.2.3 Estimativa da velocidade de desenvolvimento dos recalques com drenos verticais.

Quando se tratam de aterros construídos sobre drenos verticais, é preciso considerar o fluxo horizontal de água. Neste caso, Barron (1948, apud ALMEIDA; MARQUES, 2010) considera a Equação 20, para condições de deformações verticais iguais:

$$U_h = 1 - e^{-\left[\frac{8T_h}{F(n)}\right]} \quad (20)$$

Onde  $T_h$  pode ser obtido a partir da Equação 21.

$$T_h = \frac{c_h}{d_e^2} \cdot t \quad (21)$$

Onde  $U_h$  é o grau de adensamento;

$T_h$  é o fator tempo;

$d_e$  é o diâmetro de influência do dreno, obtido pelas Equações 24 ou 25;

$F(n)$  e  $n$  podem ser calculados respectivamente pelas Equações 22 e 23;

$ch$  é o coeficiente de adensamento horizontal.

$$F(n) = \frac{n^2}{n^2 - 1} \ln(n) - \frac{3n^2 - 1}{4n^2} \cong \ln(n) - 0,75 \quad (22)$$

Onde  $n$  é calculado pela Equação 23.

$$n = \frac{d_e}{d_w} \quad (23)$$

Onde  $d_w$  é o diâmetro do dreno ou diâmetro equivalente do geodrenos, calculado pela Equação 26.

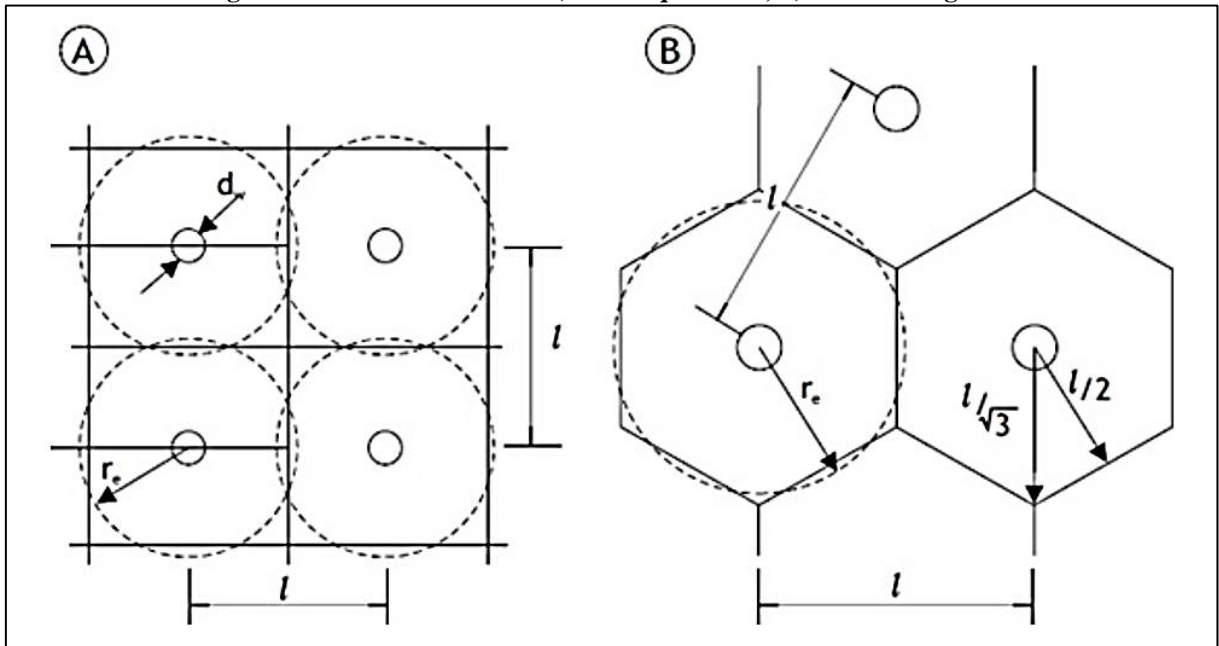
O diâmetro de influência depende da forma da malha em que os drenos foram dispostos (ver Figura 17). Almeida e Marques (2010) explicam que o diâmetro de influência para uma malha quadrada pode ser calculado pela Equação 24 ( $l$  é a distancia entre drenos).

$$d_e = 1,13l \quad (24)$$

Para malhas triangulares, tem-se a Equação 25:

$$d_e = 1,05l \quad (25)$$

Figura 17 - Malha de Drenos: a) malha quadrada; b) malha triangular.



Fonte: Almeida e Marques, 2010, p. 111.

Quanto ao diâmetro equivalente, ilustrado na Figura 18, Hansbo (1979, apud ALMEIDA; MARQUES, 2010) o calcula de acordo com a Equação 26.

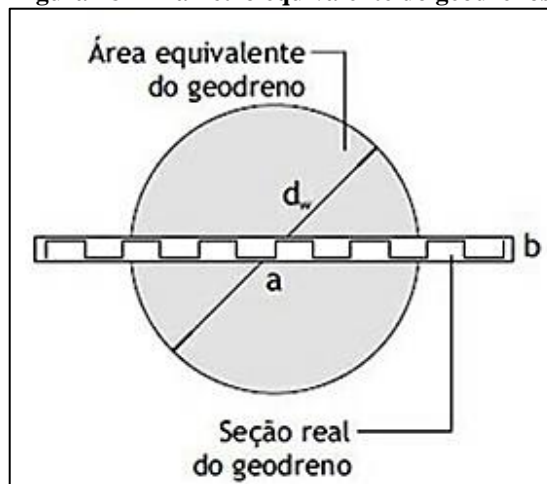
$$d_w = \frac{2(a + b)}{\pi} \quad (26)$$

Onde  $d_w$  é o diâmetro equivalente;

$a$  é a largura do geodreno;

$b$  é a espessura do geodreno.

Figura 18 - Diâmetro equivalente do geodrenos.



Fonte: Adaptado de Almeida e Marques, 2010.

#### 2.4.2.4 Consideração do tempo de construção

A aplicação de carga sobre o solo, seja por um aterro, seja por uma edificação, acontece em um período gradual e depois se estabiliza quando concluída sua construção. Segundo Terzaghi (1943), o incremento da consolidação durante esse período pode ser computado por um processo de superposição.

Ele considera inicialmente uma construção sobre uma camada de argila de espessura  $2H$  entre duas superfícies de absorção ( $h_d = H$ ), cuja construção se inicia no tempo  $t = 0$  e termina no tempo  $t_1$ . A curva  $C_1$  representa a curva tempo x recalque obtida para um aterro construído instantaneamente sobre o solo no tempo  $t = 0$ . A curva  $C$  é curva real dos recalques. Antes do término da construção a tensão é tomada igual a "p" (ver Figura 19). Sendo assim, o grau de adensamento da curva  $C$  pode ser calculado a partir da Equação 27.

$$U\% = U'\% \left( \frac{p}{p_1} \right) \quad (27)$$

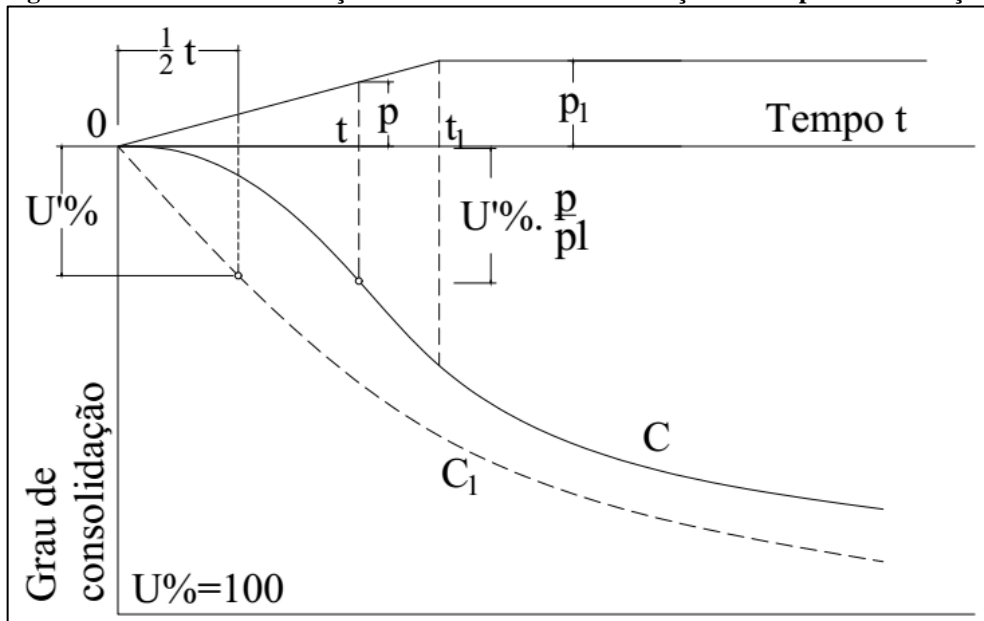
Onde  $U$  é o grau de consolidação da curva  $C_1$ ;

$U'$  é o grau de consolidação para a curva  $C$ ;

$p$  é a tensão durante o período construtivo;

$p_1$  é a tensão aplicada ao final do carregamento.

**Figura 19 - Curva de construção do aterro com a consideração do tempo de construção.**



Fonte: Adaptado de Terzaghi (1943, p. 287).

Para propósitos práticos, Terzaghi (1943) avalia admissível assumir que a consolidação após o tempo  $t_1$  será a mesma que seria caso a pressão  $p$  tivesse sido aplicada no meio do tempo de construção do aterro.

Os cálculos apresentados nesta seção se verificam apenas para acréscimos de carregamentos aproximadamente lineares ao longo do tempo.

#### 2.4.2.5 Consideração das etapas de construção

Quando a construção de um aterro em etapas é simplificada pela aplicação da carga total do aterro (ver 2.4.2.4), parte do recalque ocorre antes da aplicação da carga total. Essa situação não é prevista pela teoria do adensamento de Terzaghi.

Almeida e Marques (2010) descrevem uma metodologia de cálculo para aterros construídos em etapas: inicialmente deve-se calcular o recalque total para a altura de aterro da etapa inicial; depois, determina-se pelo método de Terzaghi o recalque ocorrido até o momento em que a segunda etapa do aterro é realizada mediante a Equação 28:

$$\Delta h(t_1) = \Delta H_1 \cdot U_{t_1} \quad (28)$$

Sendo  $U_{t_1}$  o grau de adensamento desde o tempo inicial até o momento em que a segunda etapa do aterro é concluída ( $t_1$ ),  $\Delta h$  o recalque ocorrido entre a construção da primeira e segunda etapa e  $\Delta H$  é o recalque total esperado caso o aterro permanecesse com altura igual a  $h_1$ .

A partir da construção da segunda etapa, são realizadas atualizações na altura da camada de argila, bem como nas tensões iniciais e finais, pelas Equações 29, 30 e 33.

$$h_{final} = h_{inicial} - \Delta H_1 \cdot U_{t_1} \quad (29)$$

Onde  $h_{final}$  e  $h_{inicial}$  são as espessuras final e inicial da camada de argila, respectivamente. A tensão inicial após o recalque será:

$$\sigma'_{v1} = \sigma'_{v0} + U_{t_1} \cdot (\gamma_{at} \cdot h_{at,1}) \quad (30)$$

Onde  $\sigma'_{v1}$  é a tensão efetiva inicial considerada para a segunda etapa do aterro;

$\sigma'_{v0}$  é a tensão efetiva inicial considerada para a primeira etapa do aterro;

$\gamma_{at}$  é o peso específico do aterro;

$h_{at,1}$  é a altura da primeira etapa do aterro;

A equação acima considera o aumento de tensão efetiva à medida que a poropressão se dissipa. Para a atualização da tensão efetiva final, de forma a considerar a influência da

nova camada de argila no cálculo da tensão final, a partir da expressão dada por Almeida e Marques (2010), considerando-se que  $\sigma'_f = \sigma'_{v0} + \Delta\sigma'$ , tem-se:

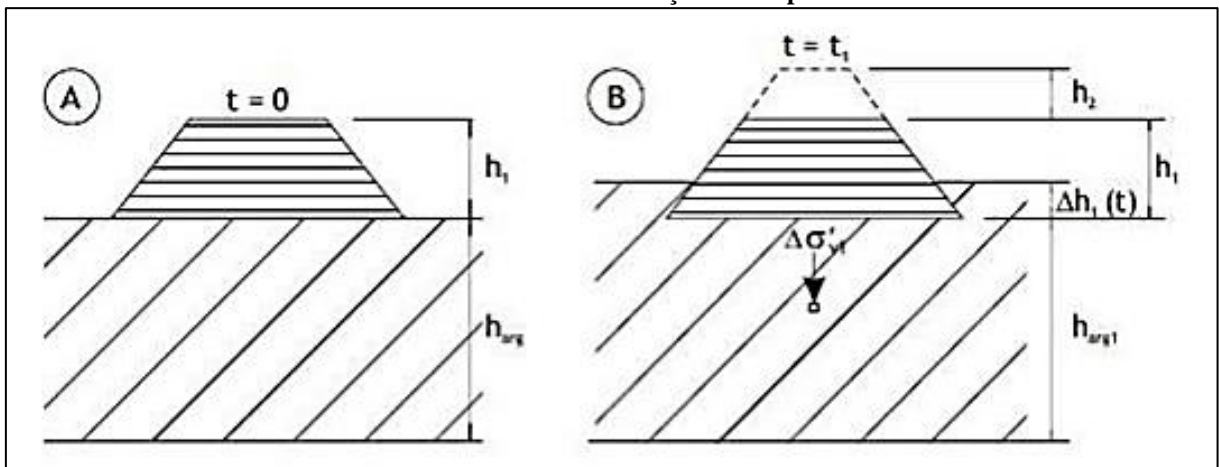
$$\sigma'_f = \sigma'_{v1} + \Delta\sigma'_{v1} + \Delta\sigma'_{v2} \quad (31)$$

$$\sigma'_f = \underbrace{\sigma'_{v0} + U_1 \cdot (\gamma_{at} \cdot h_1)}_{\sigma'_{v1}} + \underbrace{(1 - U_1) \cdot (\gamma_{at} \cdot h_1)}_{\Delta\sigma'_{v1}} + \underbrace{\gamma_{at} \cdot h_2}_{\Delta\sigma'_{v2}} \quad (32)$$

$$\sigma'_f = \sigma'_{v0} + \gamma_{at} \cdot (h_1 + h_2) \quad (33)$$

A Figura 20 representa a construção de um aterro em etapas.

**Figura 20 - Representação da construção de aterro em etapas: a) situação logo após a elevação da primeira etapa; b) situação logo após a elevação da segunda etapa; c) recalque x tempo considerando a construção em etapas.**



Fonte: Adaptado de Almeida e Marques, 2010, p. 97.

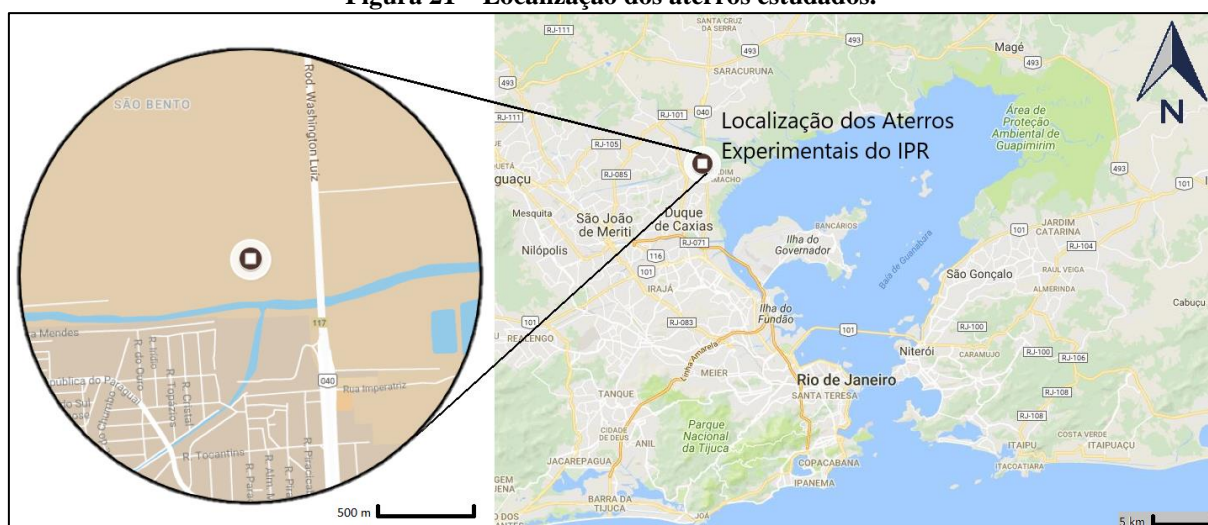
### 3 ATERROS ANALISADOS

#### 3.1 Breve introdução aos aterros utilizados neste trabalho.

Este trabalho estuda os Aterros Experimentais I e II do Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR) do Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER). Segundo Ortigão (1980), esses aterros fizeram parte um programa de pesquisas chamado “Construção de aterros sobre solos compressíveis” que teve início por volta de 1974. Esse programa tinha como objetivos um maior conhecimento do solo da região bem como o desenvolvimento de métodos experimentais e teóricos para estimar o comportamento de aterros sobre solos moles, fazendo comparações entre os resultados obtidos por cálculo e instrumentação. Além disso, também pretendia desenvolver tecnologias brasileiras de instrumentação para realizar as medições nos aterros. Os aterros foram instrumentados com o objetivo de acompanhar a evolução dos recalques e realizar comparações com métodos de cálculo. A Tabela 2 mostra as especificações de construção dos aterros e a data de suas execuções.

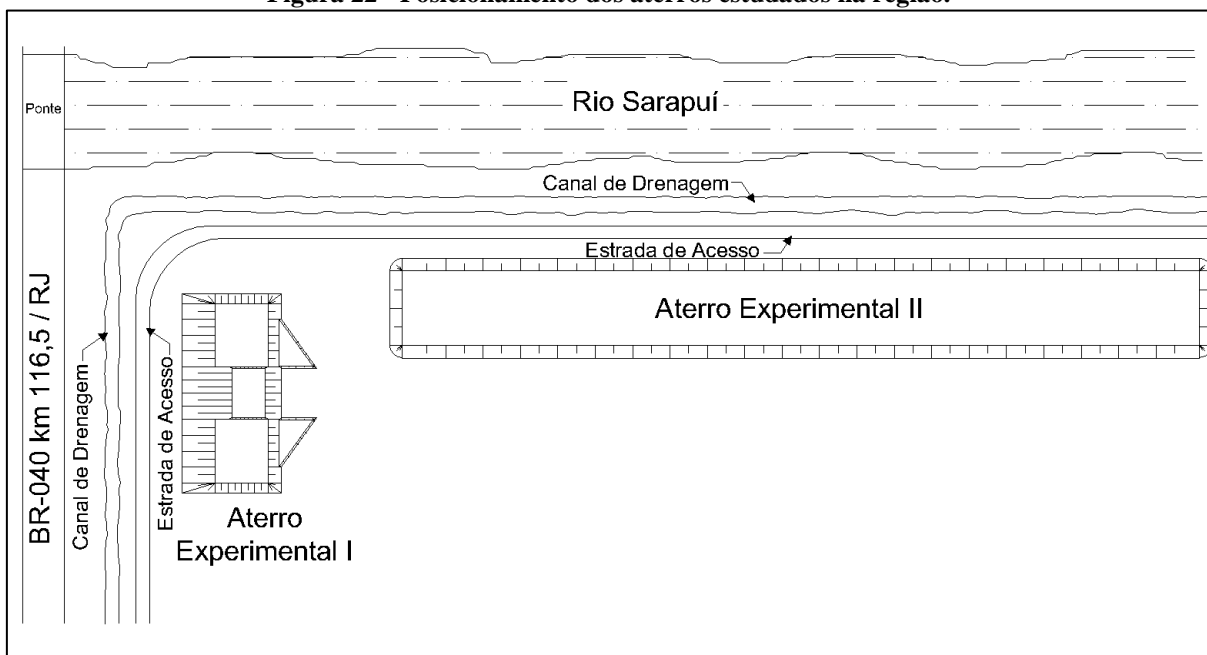
Os aterros foram realizados na Baixada Fluminense, próximo ao km 116,5 da BR-040/RJ, nas imediações do Rio Sarapuí, como mostram as Figuras 21 e 22. A região onde foram construídos os aterros possui uma camada de argila mole de aproximadamente 11 m de espessura com  $N_{SPT}$  próximo de zero seguida de uma camada de areia com aproximadamente 2 m de espessura. O depósito de argila é proveniente de sedimentos flúvio-marinhos do Quaternário e apresenta coloração acinzentada ou preta devido ao teor de matéria orgânica, em torno de 5% (IPR, 1976 apud ORTIGÃO, 1980).

**Figura 21 – Localização dos aterros estudados.**



Fonte: Google Maps (2017).

**Figura 22 - Posicionamento dos aterros estudados na região.**



Fonte: Adaptado de Terra, 1988, p. 5.

**Tabela 2 - Especificações construtivas e datas de execução dos aterros previstos para o programa de pesquisas “Construção de aterros sobre solos compressíveis”.**

Aterro experimental	Especificações de construção	Data de execução
I	Levado à ruptura	Nov a Dez/1977 <sup>1</sup>
II	Construído sobre drenos verticais	Nov/1980 a Jul/1982 <sup>2</sup>

Fonte: 1) Ortigão, 2010, p. 225. 2) Domingos, 2008, p. 80.

Ortigão (1980) realizou vários ensaios no depósito de argila mole do Sarapuí e obteve diversos parâmetros do solo pertinentes a esse trabalho (ver Apêndice A). De posse dessas informações e visando compilar as informações relevantes fornecidas por Ortigão, criou-se Tabela 3:

Para a realização deste trabalho, optou-se por utilizar as informações apresentadas nos trabalhos de Ortigão (1980), para o Aterro Experimental I, e Terra (1988), para o Aterro Experimental II, com o propósito de evitar possíveis divergências entre os dados. Esses aterros, bem como o solo mole do Sarapuí, foram estudados por diversos autores, como Domingos (2008), Futai (2010), Lima (2007), Silva (2013), Jannuzzi (2009), entre outros, havendo grande variedade de informações disponíveis na literatura.



Tabela 3 - Equações para obtenção de parâmetros do solo.

Parâmetro	Equações	
$\gamma_{sat}$	Para $z \leq 4 \text{ m} \rightarrow \gamma_{sat} = 1,29 \mp 0,01$ <sup>(2)</sup>	
	Para $z > 4 \text{ m} \rightarrow \gamma_{sat} = 1,22 + 0,018 \cdot z$ <sup>(2)</sup>	
$e_0$	Para $z \leq 4 \text{ m} \rightarrow e_0 = 4,19 \mp 0,19$ <sup>(2)</sup>	
	Para $z > 4 \text{ m} \rightarrow e_0 = 4,84 - 0,21 \cdot z$ <sup>(2)</sup>	
$\sigma'_a$	$\sigma'_a = 1,05 + 0,39 \cdot Z$ <sup>(2)</sup>	
$\sigma'_{v0}$	$\sigma'_{v0} = Z \cdot (\gamma_{sat} - \gamma_w)$ <sup>(1)</sup>	$\sigma'_{v0} = 0,32 \cdot Z$ <sup>(2)</sup>
$C_r$	$C_r = \frac{RR \cdot (e_0 - 1)}{100}$	Com $RR = 9 \mp 3$ <sup>(2)</sup>
$C_c$	$C_c = \frac{CR \cdot (e_0 - 1)}{100}$	Com $CR = 41 \mp 3$ <sup>(2)</sup>
$OCR$	$OCR = \frac{\sigma'_a}{\sigma'_{v0}}$ <sup>(3)</sup>	$OCR = \frac{3,28}{z} + 1,22$ <sup>(2)</sup>

$\gamma_{sat}$  é o peso específico saturado do aterro;

$e_0$  é o índice de vazios inicial do solo;

$\sigma'_a$  e a tensão efetiva de sobreadensamento;

$\sigma'_{v0}$  é tensão vertical efetiva inicial;

$C_r$  é o índice de recompressão;

$C_c$  é o índice de compressão;

$OCR$  é a razão de sobreadensamento;

$z$  é a profundidade.

$RR$  e  $CR$  são parâmetros de compressibilidade definidos por Ortigão (1980) para o solo mole do Sarapuí.

<sup>(1)</sup> Equação adotada para os cálculos neste trabalho devido à variação de taxa de  $\gamma_{sat}$ .

<sup>(2)</sup> Equações obtidas a partir de ensaios de laboratório, Ortigão (1980).

<sup>(3)</sup> Equação adotada para os cálculos neste trabalho.

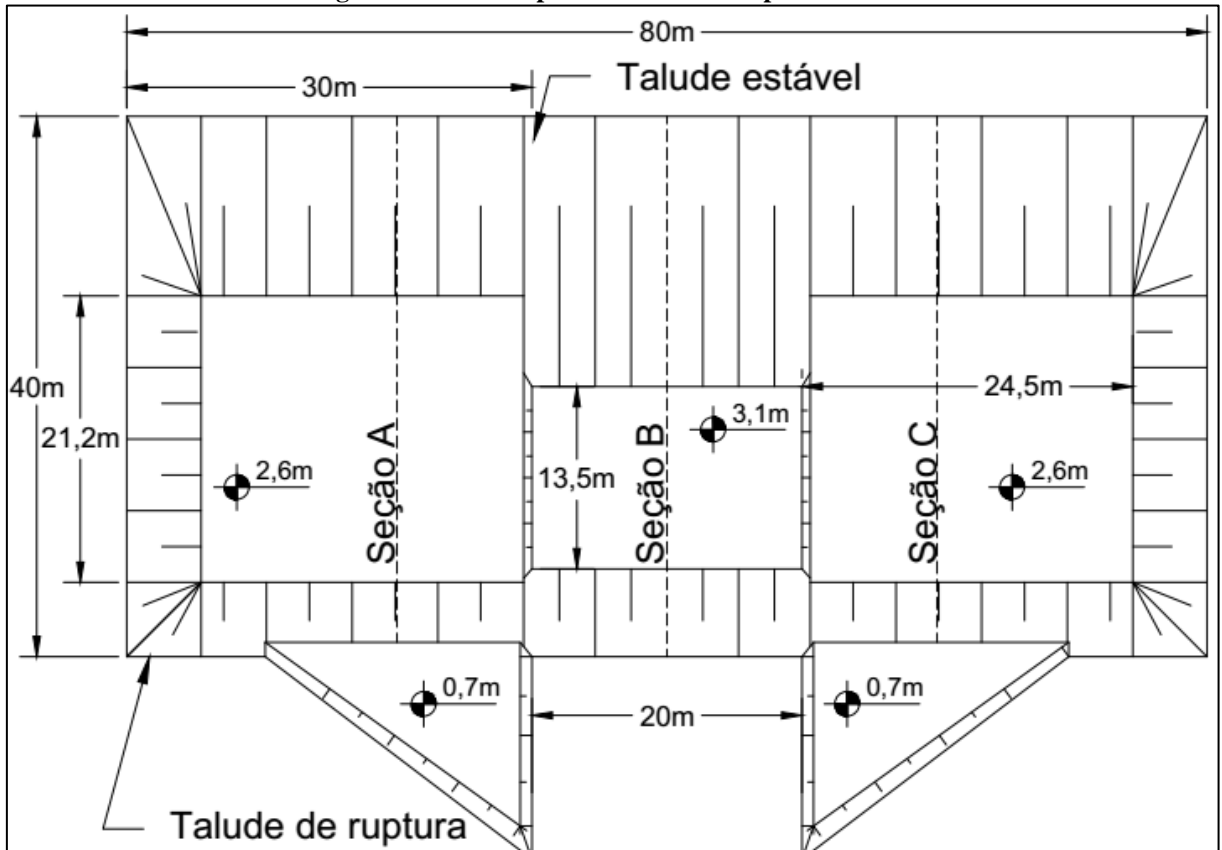
Fonte: Adaptado de Ortigão, 1980.

### 3.2 Aterro Experimental I - Ortigão (1980)

O projeto previa a construção de 4 m de altura de aterro com inclinação do talude estável de 1V:6H e o de ruptura 1V:2H. Contava ainda com duas bermas laterais de 0,7 m cada uma, que se estendiam a 15 m a frente do talude de ruptura e eram espaçadas em 20 m. Com o propósito de garantir a ruptura no centro do aterro, optou-se por realizar a elevação de todo o aterro até os 2 m de altura, seguido de uma elevação da seção principal de 0,5 m e depois incremento de 0,3 m em todo o aterro. A geometria final do aterro pode ser vista na Figura 23.

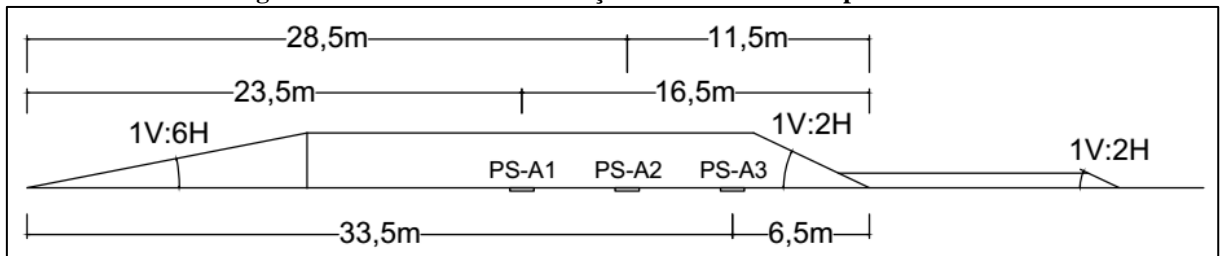
As seções A, B e C da Figura 23 do aterro indicam o posicionamento das placas de recalque, cujos resultados serão utilizados neste trabalho. As seções transversais do aterro são detalhadas nas Figuras 24, 25 e 26. Essas figuras também mostram o posicionamento das placas de recalque utilizadas para as medições de deslocamentos em campo.

**Figura 23 - Vista superior do Aterro Experimental I**



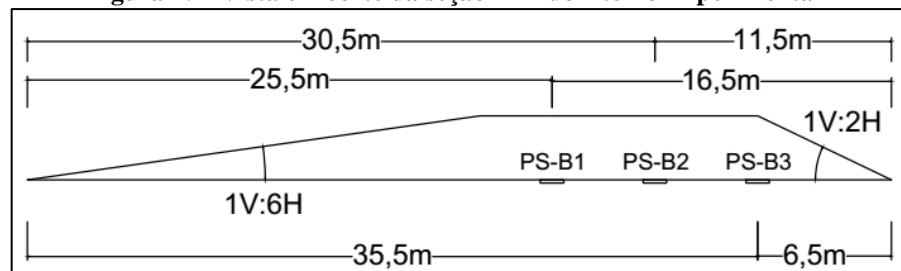
Fonte: Adaptado de Ortigão, 1980, p. 220 a 224.

**Figura 24 - Vista em corte da seção "A" do Aterro Experimental I**



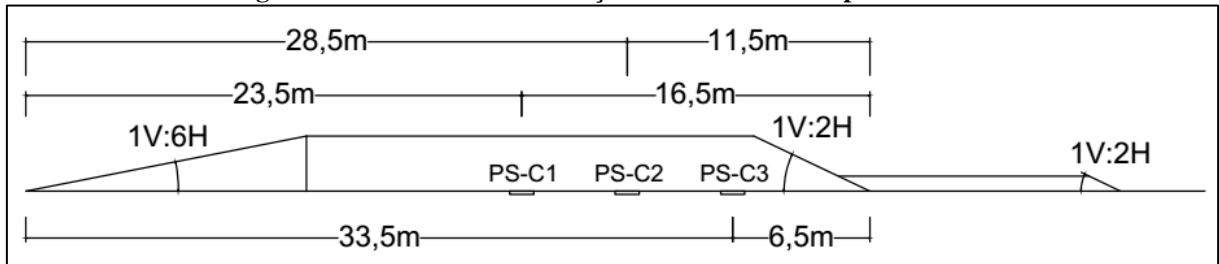
Fonte: Adaptado de Ortigão, 1980, p. 223.

**Figura 25 - Vista em corte da seção "B" do Aterro Experimental I**



Fonte: Adaptado de Ortigão, 1980, p. 222.

**Figura 26 - Vista em corte da seção "C" do Aterro Experimental I**



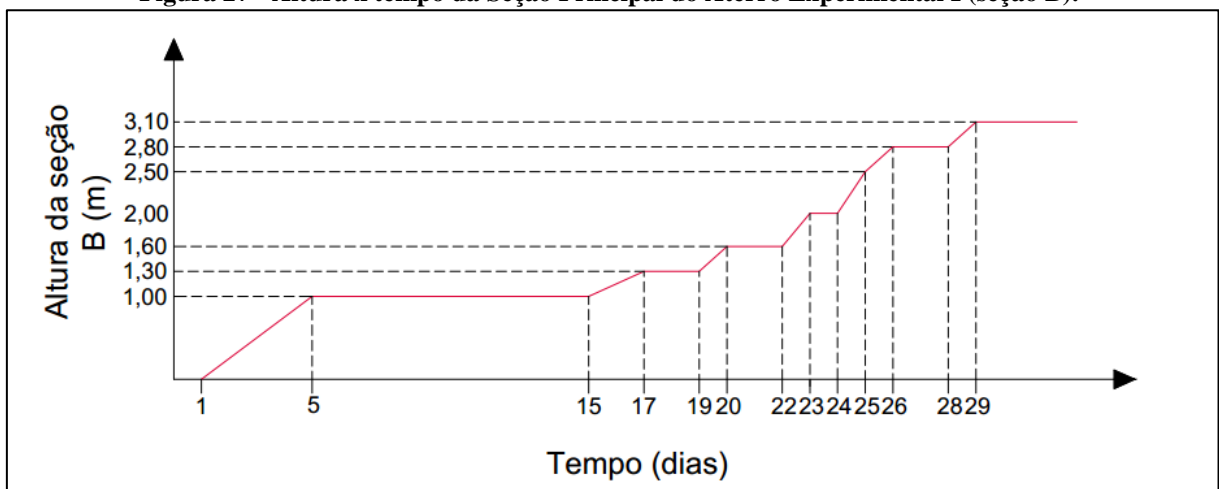
Fonte: Adaptado de Ortigão, 1980, p. 224.

O material do aterro tinha característica areno-siltosa e depois da realização de ensaio de cone de areia determinou-se o peso específico do solo do aterro seco  $\gamma_{smédio} = 16,25kN/m^3$  e considerando a umidade na qual o solo do aterro foi depositado, tem-se  $\gamma_{aterro} = 18,03kN/m^3$ , aproximadamente.

O aterro foi construído visando à ruptura, o que produziria experiência quanto aos métodos construtivos e instrumentação de aterros sobre solos moles naquela região. Só depois, com base nos dados obtidos na construção e ruptura do Aterro Experimental I, seriam atualizados os anteprojetos dos aterros II e III e iniciar-se-ia a construção dos mesmos.

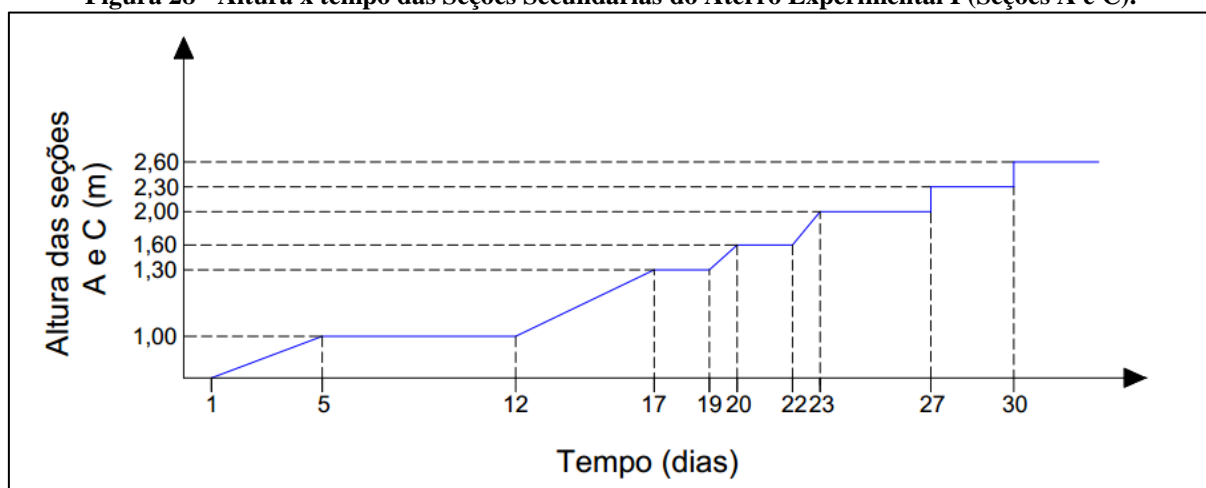
O aterro experimental I foi construído em 30 dias entre 07/11/1977 e 07/12/1977, até a cota de 3,1 m, quando o aterro apresentou ruptura caracterizada pelo fissuramento e o levantamento do pé do talude. Mas antes disso, com 2,5 m de elevação, já havia apresentado fissuração. Na altura de 2,8 m, a fissura chegou a 5 cm de espessura e os inclinômetros indicavam forte variação de leituras, indicando a instabilidade do aterro. A sequência executiva do aterro pode ser vista nas Figuras 27 e 28.

**Figura 27 - Altura x tempo da Seção Principal do Aterro Experimental I (seção B).**



Fonte: Adaptado de Ortigão, 1980, p. 225.

**Figura 28 - Altura x tempo das Seções Secundárias do Aterro Experimental I (Seções A e C).**



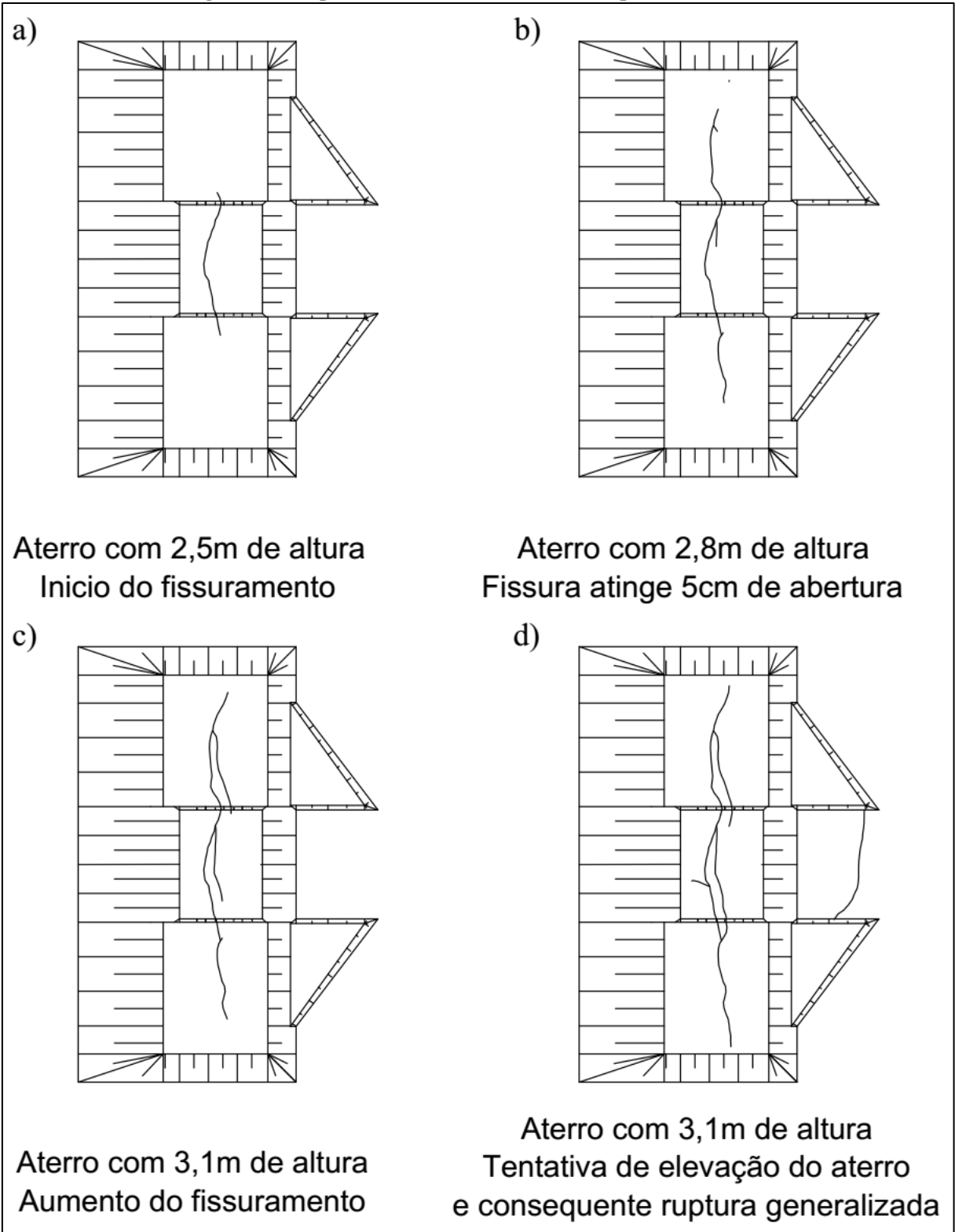
Fonte: Adaptado de Ortigão, 1980, p. 225.

Os primeiros indícios de que o aterro estava instável surgiram quando aos 2,5 m de altura da seção principal (seção B), quando apresentou uma fissura de abertura inferior a 1 cm que se estendia por toda a plataforma da seção. A instrumentação, por outro lado, não demonstrava qualquer indicio de instabilidade. Quando uma nova camada foi construída e a seção principal atingiu 2,8 m, verificou-se uma propagação da fissura, que se estendeu pelas plataformas das seções laterais (seções A e C). Apenas os inclinômetros demonstraram forte variação em relação aos dados coletados para a altura de 2,5m.

Quando o aterro atingiu a cota de 3,1 m foi realizada uma nova leitura na instrumentação e verificaram-se grandes variações entre as novas medições e as anteriores. A fissura na seção principal já atingia 5 cm de abertura, mas ainda não era possível ver desníveis. Enquanto era realizada a elevação das seções laterais do aterro, foi verificado um lento processo de ruptura por causa do pequeno levantamento à frente do aterro. A ruptura continuou se desenvolvendo lentamente, e surgiu uma nova fissura na crista do aterro, a 1 m de distância da fissura anterior.

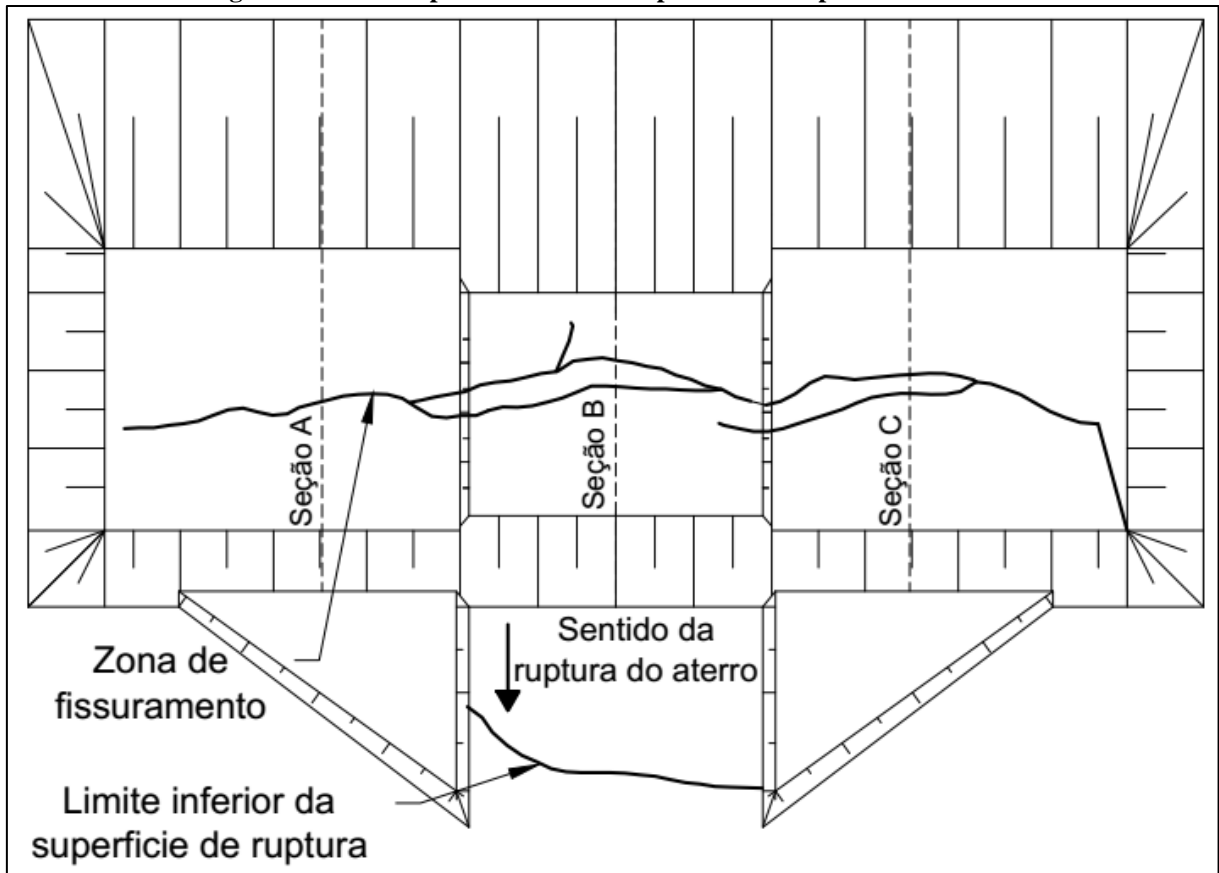
Por fim, quando foi realizada uma tentativa de elevar o aterro, depositando material sobre a seção principal, ocorreu uma considerável elevação do solo à frente do aterro, um notável aumento das fissuras e o desnivelamento do patamar do aterro. Estava caracterizada a ruptura. Essa sequência pode ser observada na Figura 29 e o resultado Final pode ser visto na Figura 30.

**Figura 29 – Sequencia do desenvolvimento da ruptura do aterro.**



Fonte: Adaptado de Ortigão, 1980, p. 227.

**Figura 30 - Vista superior do Aterro Experimental I após fissuramento**

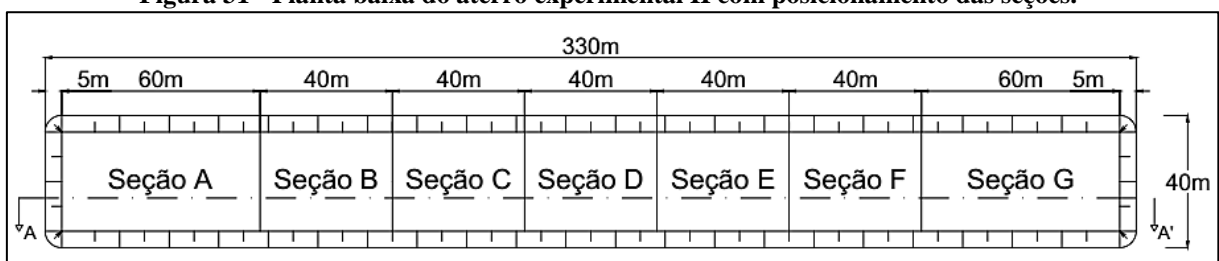


Fonte: Adaptado de Ortigão, 1980, p. 254.

### 3.3 Aterro Experimental II - Terra (1988)

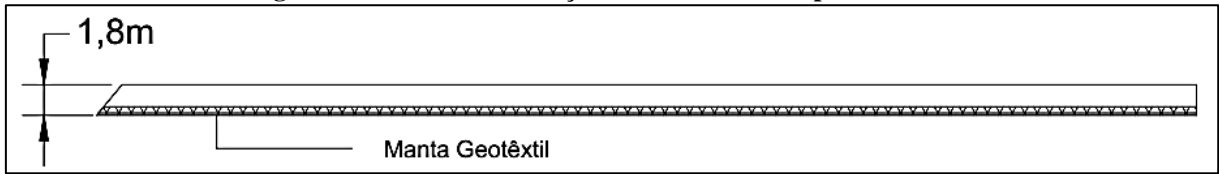
O aterro experimental II tem comprimento total de 330 m e largura de 40 m, e é dividido em sete seções, conforme a Figura 30, das quais cinco possuem drenos verticais, sendo 3 destas com drenos de areia e duas com geodrenos. Sob o aterro foi construído um colchão drenante. Na seção A, esse colchão é composto por manta geotêxtil; nas demais seções, o colchão drenante é composto por areia. O corte AA' detalha a configuração transversal de cada uma das seções (Figuras 31 a 37).

**Figura 31 - Planta baixa do aterro experimental II com posicionamento das seções.**



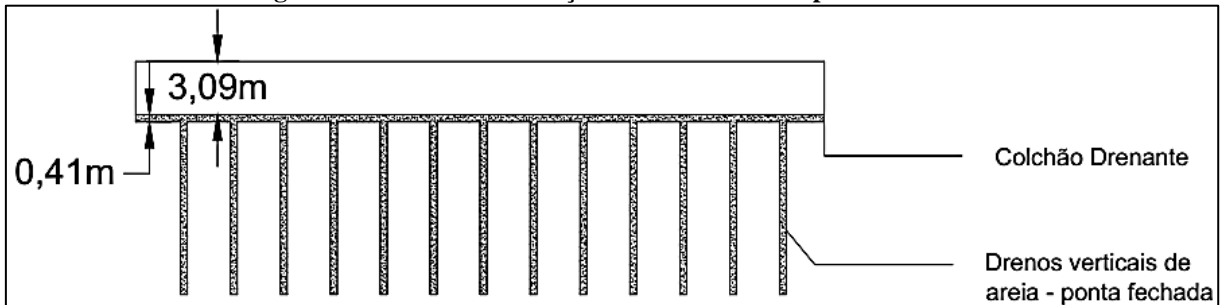
Fonte: Adaptado de Terra, 1988, p. 14.

**Figura 32 - Corte AA' na seção "A" do Aterro Experimental II**



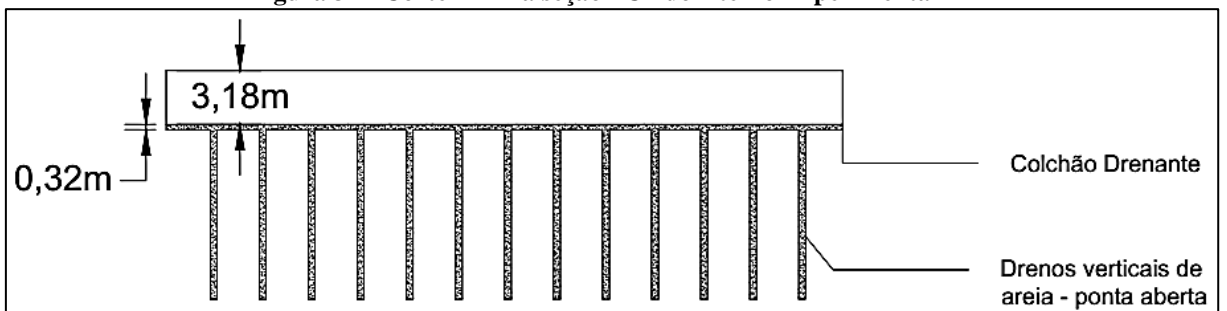
Fonte: Adaptado de Terra, 1988, p. 14.

**Figura 33 - Corte AA' na seção "B" do Aterro Experimental II**



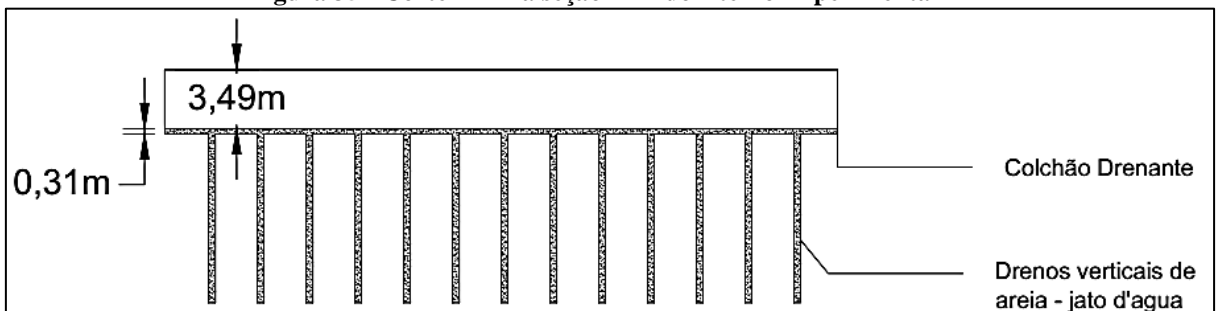
Fonte: Adaptado de Terra, 1988, p. 14.

**Figura 34 - Corte AA' na seção "C" do Aterro Experimental II**



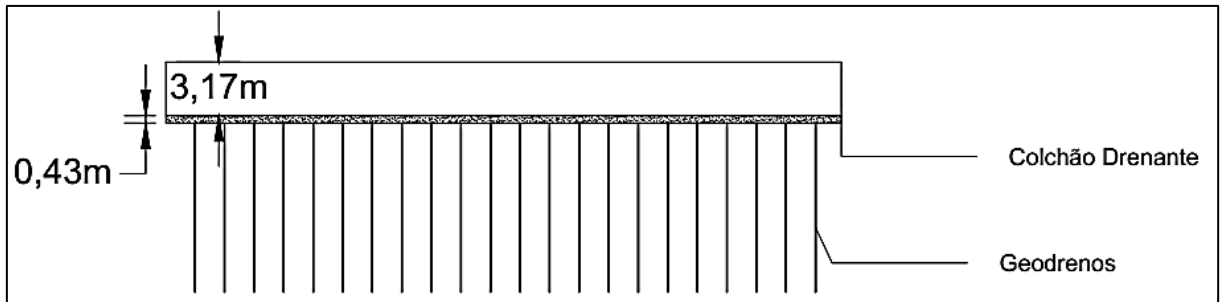
Fonte: Adaptado de Terra, 1988, p. 14.

**Figura 35 - Corte AA' na seção "D" do Aterro Experimental II**



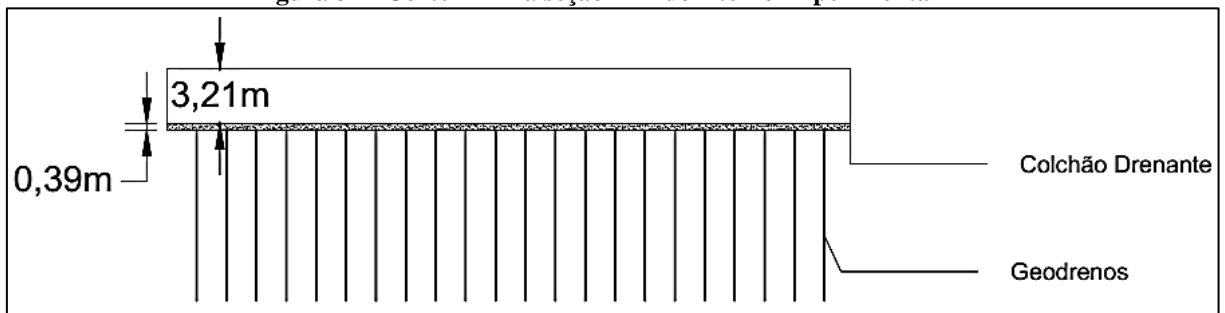
Fonte: Adaptado de Terra, 1988, p. 14.

**Figura 36 - Corte AA' na seção "E" do Aterro Experimental II**



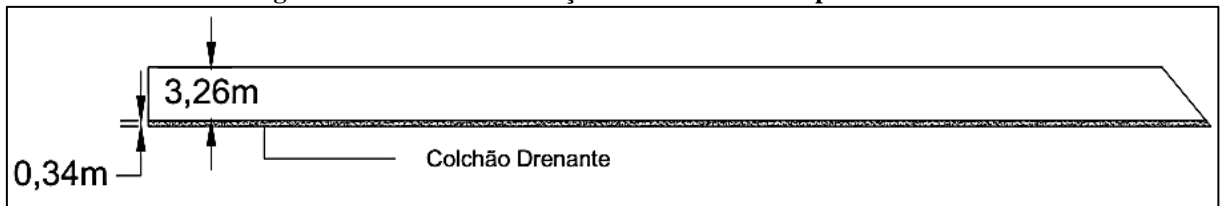
Fonte: Adaptado de Terra, 1988, p. 14.

**Figura 37 - Corte AA' na seção "F" do Aterro Experimental II**



Fonte: Adaptado de Terra, 1988, p. 14.

**Figura 38 - Corte AA' na seção "G" do Aterro Experimental II**



Fonte: Adaptado de Terra, 1988, p. 14.

A construção do aterro seguiu três etapas de construção: na primeira foi realizada a construção do colchão drenante e posteriormente a deposição do material da jazida até aproximadamente 1 m de profundidade. Na segunda etapa do carregamento deu-se a elevação do aterro até aproximadamente 2 m de profundidade e na terceira, até aproximadamente 3,5 m. Essas etapas se dividiram em duas fases, com a primeira fase abrangendo as duas primeiras etapas. Os pesos específicos de cada deposição, bem como as datas de início e de fim de cada etapa de carregamento são mostrados nas Tabelas 4 e 5. Apesar de a autora considerar três etapas de carregamento, este ocorreu em várias pequenas etapas (ver Figuras 38 a 44).

**Tabela 4 - Características do aterro II na primeira fase do carregamento.**

Seção	$h_{arg}$	$\gamma_{arg}$	1ª etapa do carregamento					2ª etapa do carregamento				
			$t_0$	$t_f$	$\Delta t$	$\gamma_{at}$	$h$	$t_0$	$t_f$	$\Delta t$	$\gamma_{at}$	$h$
A	10,50	13,08	20/11/80	28/01/81	69	19,30	1,05	30/08/81	20/10/81	51	19,30	1,80
B	10,50	13,08	26/12/80	28/01/81	33	19,80	0,80	16/08/81	20/10/81	65	19,40	1,80
C	10,50	13,08	23/12/80	30/01/81	38	19,70	0,65	22/08/81	30/10/81	69	19,50	1,80
D	10,50	13,08	22/12/80	30/01/81	39	19,70	0,65	21/08/81	02/11/81	73	19,50	2,10
E	10,20	13,08	12/12/80	28/12/80	16	20,20	0,40	08/08/81	30/11/81	114	19,50	1,90



F	10,00	13,08	20/12/80	26/01/81	37	19,80	0,70	12/08/81	16/12/81	126	19,40	1,90
G	9,00	13,08	08/01/81	30/01/81	22	19,50	0,90	26/08/81	07/07/82	315	19,50	1,90

$h_{arg}$  = Espessura da camada de argila (m);

$\gamma_{arg}$  = Peso específico argila ( $kN/m^3$ );

$t_0$  = Data de início da construção;

$t_f$  = Data de final da construção;

$\Delta t$  = Tempo de construção (dias);

$\gamma_{at}$  = Peso específico aterro ( $kN/m^3$ );

$h$  = Altura do aterro.

Fonte: Adaptado de Terra, 1988, p. 66.

**Tabela 5 - Características do aterro II na segunda fase do carregamento.**

Seção	$h_{arg}$	$\gamma_{arg}$	3ª etapa do carregamento					h
			$t_0$	$t_f$	$\Delta t$	$\gamma_{at}$		
A	10,50	13,08	-	-	-	-	-	
B	10,50	13,08	15/01/86	27/01/86	12	15,50	3,5	
C	10,50	13,08	14/01/86	24/01/86	10	15,80	3,5	
D	10,50	13,08	16/01/86	24/01/86	8	16,00	3,8	
E	10,20	13,08	17/01/86	25/01/86	8	14,80	3,6	
F	10,00	13,08	18/01/86	25/01/86	7	16,20	3,6	
G	9,00	13,08	21/01/86	27/01/86	6	16,80	3,6	

$h_{arg}$  = Espessura da camada de argila (m);

$\gamma_{arg}$  = Peso específico argila ( $kN/m^3$ );

$t_0$  = Data de início da construção;

$t_f$  = Data de final da construção;

$\Delta t$  = Tempo de construção (dias);

$\gamma_{at}$  = Peso específico aterro ( $kN/m^3$ );

$h$  = Altura do aterro.

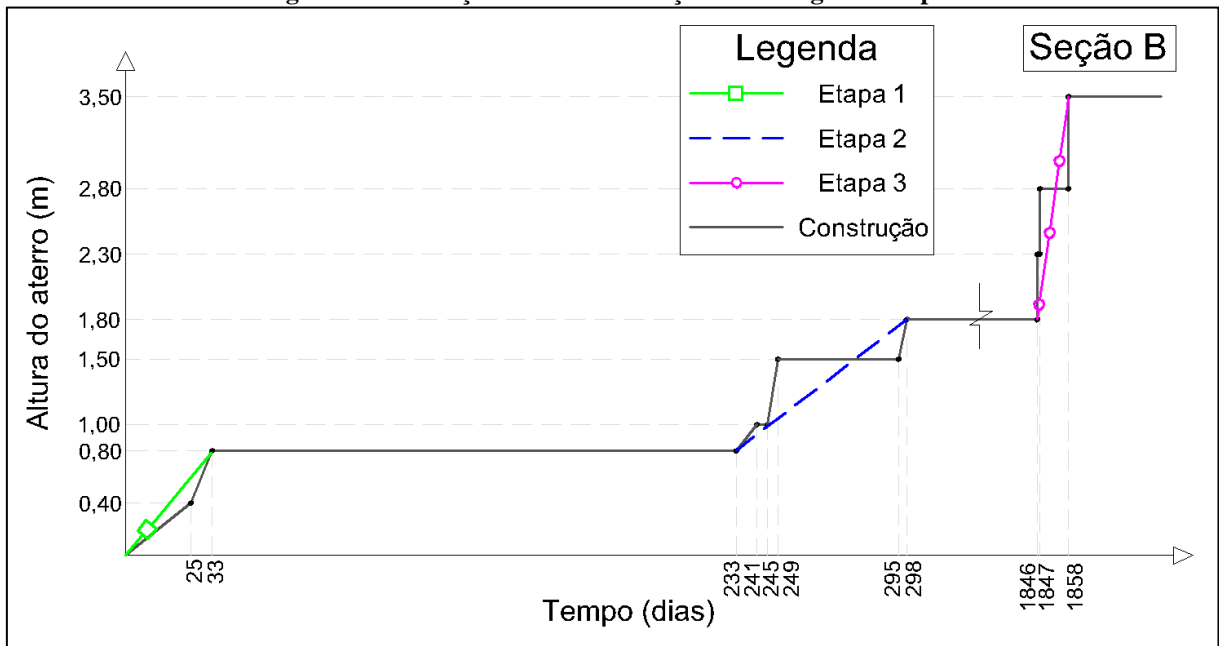
Fonte: Adaptado de Terra, 1988, p. 66.

**Figura 39 - Variação de altura da seção A ao longo do tempo.**



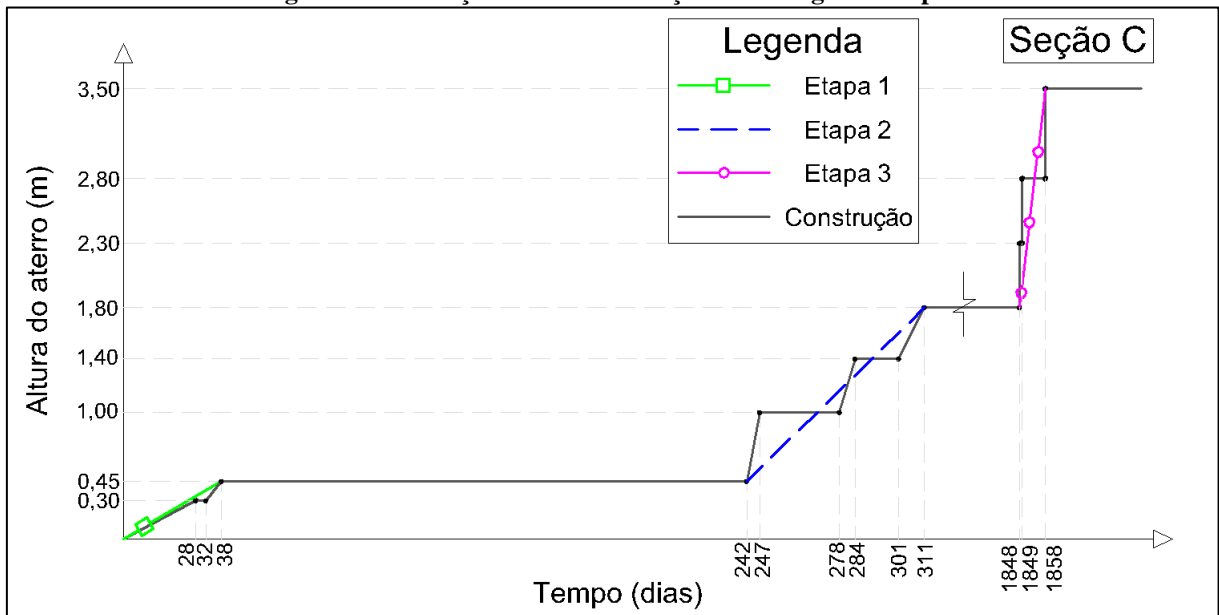
Fonte: Adaptado de Terra, 1988, p. 16.

Figura 40 - Variação de altura da seção B ao longo do tempo.



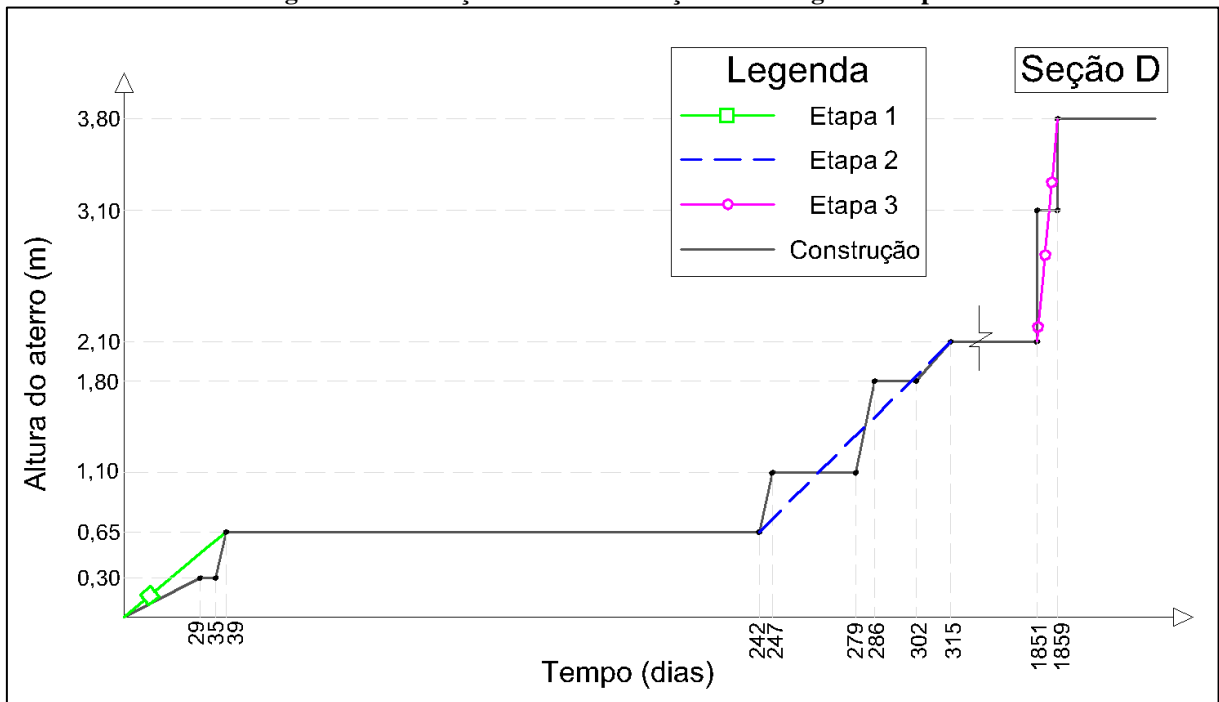
Fonte: Adaptado de Terra, 1988, p. 16.

Figura 41 - Variação de altura da seção C ao longo do tempo.



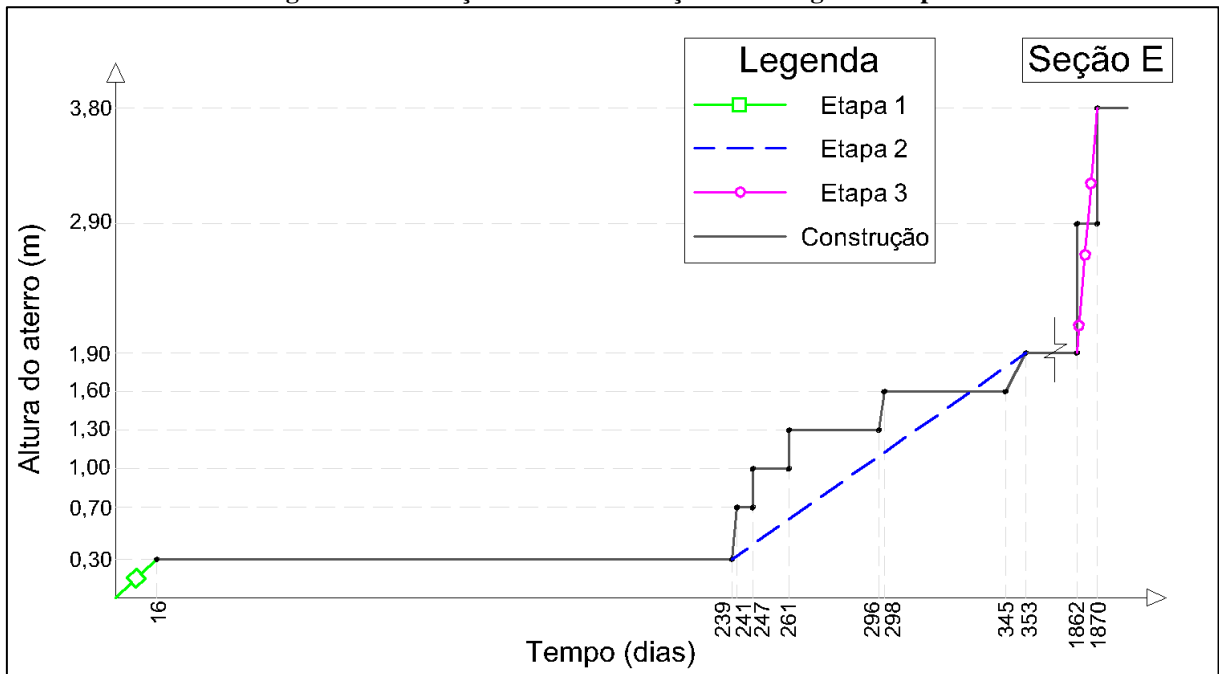
Fonte: Adaptado de Terra, 1988, p. 16.

Figura 42 - Variação de altura da seção D ao longo do tempo.



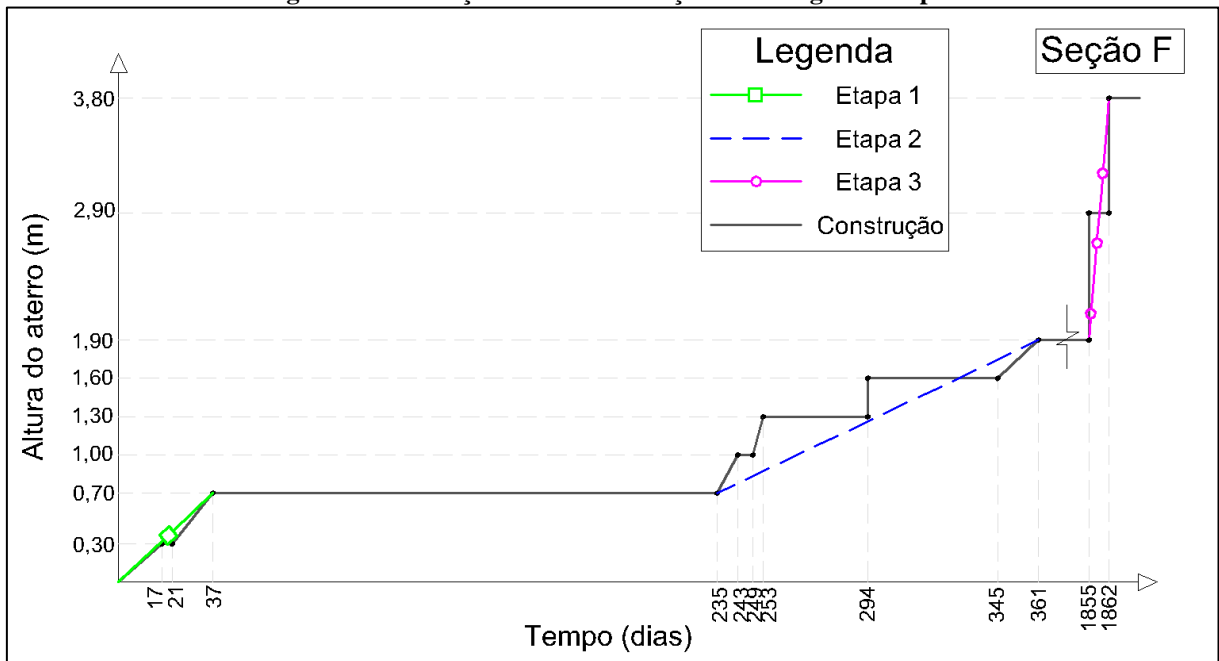
Fonte: Adaptado de Terra, 1988, p. 17.

Figura 43 - Variação de altura da seção E ao longo do tempo.



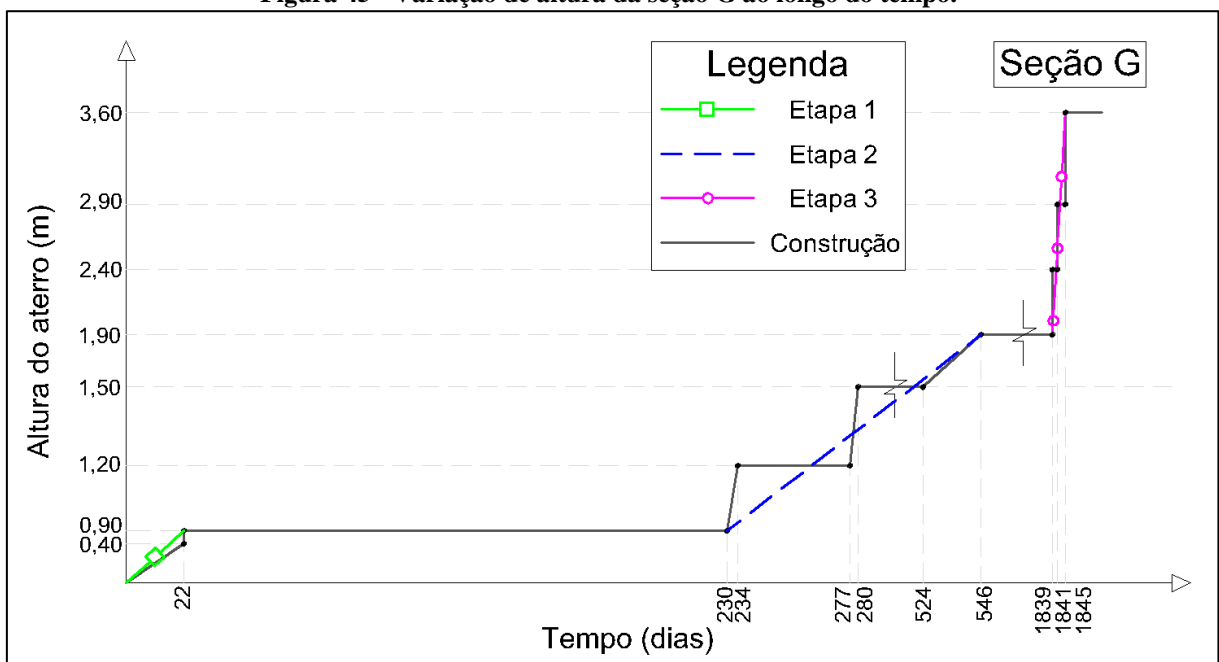
Fonte: Adaptado de Terra, 1988, p. 17.

Figura 44 - Variação de altura da seção F ao longo do tempo.



Fonte: Adaptado de Terra, 1988, p. 18.

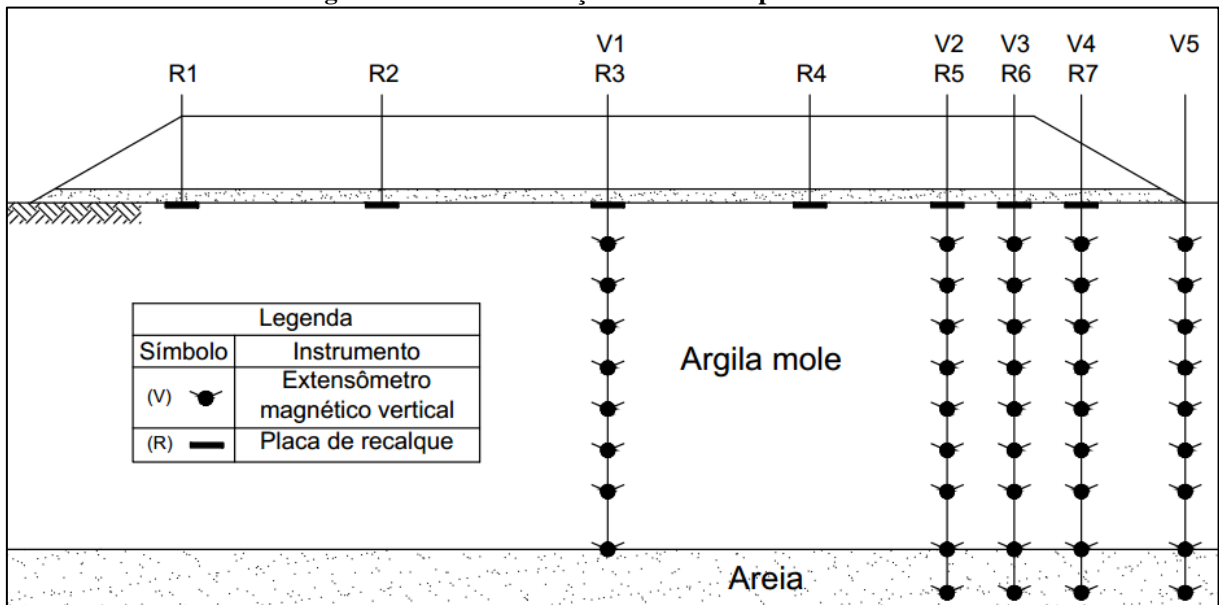
Figura 45 - Variação de altura da seção G ao longo do tempo.



Fonte: Adaptado de Terra, 1988, p. 18.

A instrumentação do aterro foi disposta como mostrado na Figura 45 (fora de escala). As placas de recalque cujas medições foram usadas neste trabalho foram aquelas posicionadas no centro das seções do aterro (representadas como R3 na Figura 45), exceto pela placa da seção E que apresentou problemas, e portanto a partir da segunda fase as medidas passaram a ser realizadas com uma placa adjacente (R12, não mostrada na Figura 45).

Figura 46 - Instrumentação do aterro experimental II.



Fonte: Adaptado de Terra, 1988, p. 21.

## 4 METODOLOGIA

Este capítulo descreve as metodologias de cálculos utilizadas para a estimativa dos recalques nos aterros I e II bem como o passo-a-passo utilizado no programa SETTLE 3D<sup>®</sup> além de parâmetros e considerações feitas para cada um dos aterros.

### 4.1 Parâmetros do solo mole

Os parâmetros do solo para cálculo do adensamento primário foram obtidos a partir das equações apresentadas na Tabela 6, algumas das quais são fornecidas por Ortigão (1980) e obtidas a partir dos ensaios de campo. Os parâmetros usados para os cálculos de recalque do solo do aterro experimental I podem ser encontrados na Tabela 6. Os parâmetros calculados para as seções do aterro II, por serem idênticas às calculadas para o aterro I até os 9 m de profundidade, foram movidas para o Apêndice B.

Tabela 6 - Parâmetros do solo mole sob o aterro experimental I.

C.	Prof. I.(m)	Prof. F.(m)	$\Delta h$ (m)	$z_{méd}$ (m)	$\gamma_{sat}$ ( $kN/m^3$ )	$\sigma'_a$ ( $kN/m^2$ )	$\sigma'_{V0}$ ( $kN/m^2$ )	$C_r$	$C_c$	$e_0$	OCR
1	0,0	1,0	1,0	0,5	12,74	12,20	1,37	0,22	1,49	4,38	8,91
2	1,0	2,0	1,0	1,5	12,74	16,02	4,11	0,22	1,49	4,38	3,90
3	2,0	3,0	1,0	2,5	12,74	19,85	6,85	0,22	1,49	4,38	2,90
4	3,0	4,0	1,0	3,5	12,74	23,67	9,59	0,22	1,49	4,38	2,47

5	4,0	5,0	1,0	4,5	12,75	27,49	12,37	0,19	1,27	3,90	2,22
6	5,0	6,0	1,0	5,5	12,93	31,31	16,09	0,18	1,18	3,69	1,95
7	6,0	7,0	1,0	6,5	13,10	35,13	20,17	0,16	1,09	3,48	1,74
8	7,0	8,0	1,0	7,5	13,28	38,96	24,59	0,15	1,00	3,27	1,58
9	8,0	9,0	1,0	8,5	13,46	42,78	29,37	0,14	0,90	3,06	1,46
10	9,0	10,0	1,0	9,5	13,63	46,60	34,50	0,12	0,81	2,85	1,35
11	10,0	11,0	1,0	10,5	13,81	50,42	39,99	0,11	0,72	2,64	1,26

$\Delta h$  = espessura da camada de argila

$z_{méd}$  = profundidade média da camada

$\gamma_{sat}$  = peso específico saturado da argila

$\sigma'_a$  = tensão efetiva de pré adensamento

$\sigma'_{V0}$  = tensão efetiva vertical inicial

$Cr$  = índice de recompressão

$Cc$  = índice de compressão

$e_0$  = índice de vazios inicial

$OCR$  = razão de sobreadensamento

Fonte: Autor.

Os parâmetros de adensamento no tempo e os coeficientes de adensamento vertical e horizontal foram obtidos a partir das curvas de adensamento no tempo. Os autores, Ortigão (1980) e Terra (1988) apresentaram faixas de valores possíveis. As faixas de valores e os valores adotados se encontram na Tabela 7.

**Tabela 7 - Valores de  $c_v$  admissíveis e adotados.**

<b>Aterro I <sup>(1)</sup></b>				
Faixa de $c_v$ ( $10^{-4}$ cm <sup>2</sup> /s)			cv adotado ( $10^{-4}$ cm/s)	
1		10	6,5	
<b>Aterro II <sup>(2)</sup></b>				
Seção	Fase	Faixa de $c_v$ ou $ch$ <sup>(2)</sup> ( $10^{-4}$ cm <sup>2</sup> /s)		cv ou ch adotado <sup>(2)</sup> ( $10^{-4}$ cm/s)
A	1	20	50	20 <sup>(1)</sup>
B	1	3	6	6
	2	4	6	6
C	1	3	4	4
	2	6	10	10
D	1	3	6	6
	2	4	6	6
E	1	3	6	4,5
	2	4	8	6
F	1	3	6	4
	2	4	8	4
G	1	20	50	20 <sup>(1)</sup>
	2	10	20	10 <sup>(1)</sup>

(1) Valores submetidos à retroanálise.

(2)  $c_v$  para as seções A e G e  $ch$  para as seções B, C, D, E e F.

$c_v$  = coeficiente de adensamento vertical.

$ch$  = coeficiente de adensamento secundário.

Fonte: 1) Ortigão, 1980. 2) Terra, 1988.

## 4.2 Métodos analíticos

Nesta seção serão apresentadas as metodologias de cálculos analíticos empregados para os aterros. Porém, antes disso, são feitas algumas considerações iniciais:

- 1) Tanto o recalque imediato quanto o recalque por adensamento secundário foram desconsiderados nos cálculos;
- 2) O nível d'água no solo era coincidente com a superfície do terreno;
- 3) Foi desconsiderado o efeito de submersão do aterro;
- 4) Foi desconsiderada a influência do efeito do amolgamento da cravação dos drenos verticais;
- 5) Foi desconsiderada a drenagem vertical das seções dos aterros que apresentavam drenos verticais por motivo do depósito de argila ter, em geral, espessura superior a 10 m;
- 6) Para o cálculo de tensões efetivas e recalques totais, particionou-se a camada de argila a cada metro de profundidade para obter-se maior precisão nos resultados;

#### 4.2.1 Metodologia de cálculo de tensões

Para o cálculo de tensões no solo devido ao carregamento do aterro foi utilizada o método de Osterberg (apresentado em 2.3.4) para ambos os aterros. Adotou-se esse método pela geometria do aterro e pela praticidade de se implementar em planilha eletrônica.

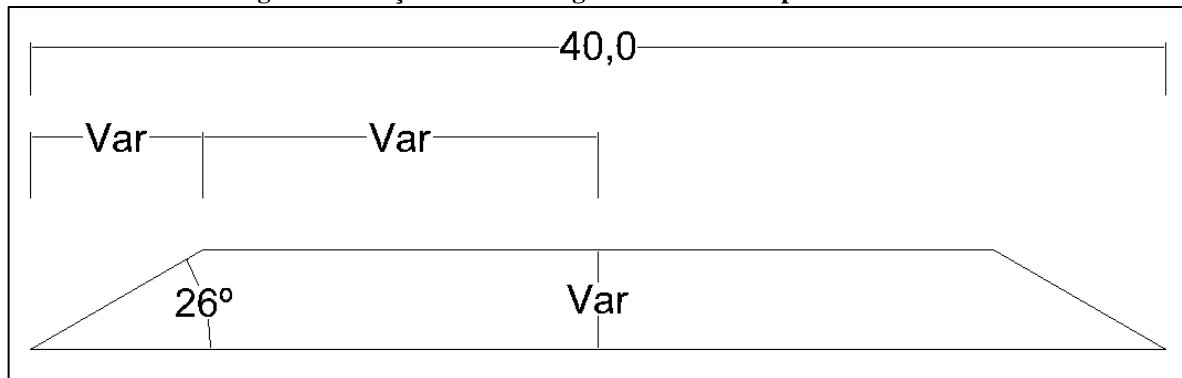
- Aterro experimental I:

Para os cálculos foram utilizadas as seções do aterro I como mostrado nas Figuras 24, 25 e 26 e como essas seções não eram simétricas foi necessário utilizar a Equação 5 para ambos os lados do aterro separadamente. As tensões foram calculadas para os pontos onde as placas de recalque foram posicionadas, variando apenas a profundidade.

- Aterro experimental II:

Os cálculos para o aterro experimental II foram realizados com base na seção genérica do aterro experimental II, mostrada na Figura 46. Por isso, adotou-se uma inclinação de talude de 26°. As seções eram simétricas e por isso foi utilizada a Equação 6. Para tentar aproximar os resultados dos dados de instrumentação obtidos em campo, as tensões foram calculadas para os pontos (no plano) onde as placas de recalque foram posicionadas, ou seja, no centro do aterro, variando apenas a profundidade.

**Figura 47 - Seção transversal genérica utilizada para os cálculos**



Fonte: Autor.

#### 4.2.2 Metodologia de cálculo de recalques totais

Os recalques totais foram calculados pelo método convencional explicado em 2.4.2.1. Para isso foi considerada que a argila se encontrava entre duas camadas drenantes de solo, sendo assim  $Hd = \frac{h_{arg}}{2}$  (distancia de drenagem é igual à metade da camada de argila).



#### 4.2.3 Metodologia de cálculo de recalques no tempo

- Aterro experimental I:

Como o tempo de construção do aterro foi muito curto e seguido de ruptura, situação na qual a teoria do adensamento não é válida. Foi necessário avaliar os recalques para cada etapa de construção mostrada nas Figuras 27 e 28. Foi considerado o tempo de construção de cada etapa considerando a simplificação da carga aplicada na metade do tempo da etapa de construção, como exposto em 2.4.2.4 e aplicado o método da consideração das etapas de construção exposto em 2.4.2.5.

- Aterro experimental II:

Foram utilizadas duas formas de cálculo dos recalques no tempo. Para as seções do aterro que possuíam drenos verticais, foi aplicado o método exposto em 2.4.2.3, enquanto nas demais seções seguiu-se o método tradicional exposto em 2.4.2.2. Como o tempo de adensamento neste caso era mais significativo, foi possível variar os métodos e verificar a influência da consideração de tempo de construção do aterro. Para isso foram utilizadas as Figuras 38 a 44 e as seguintes metodologias:

Metodologia 1 - Aplicação do método exposto em 2.4.2.5 para a linha “construção” dos gráficos de elevação de aterro no tempo, onde cada linha inclinada, quando havia incremento da altura no tempo, foi considerada uma etapa de construção.

Metodologia 2 - Aplicação do método exposto em 2.4.2.5 para as linhas “etapas” dos gráficos de elevação de aterro no tempo onde as etapas são justamente as mostradas no gráfico.

### 4.3 Programa SETTLE 3D<sup>®</sup>

Para a estimativa computacional dos recalques, foi realizada a modelagem dos aterros e do solo no software *SETTLE 3D<sup>®</sup>* versão 3.0 desenvolvido pela empresa Rocscience. Da mesma forma que os cálculos analíticos, as camadas foram particionadas a cada metro da camada de argila para obter-se maior precisão nos parâmetros utilizados.

#### 4.3.1 Metodologia de cálculo de tensões

Para o cálculo das tensões geradas pelos aterros, foram usados os métodos de Boussinesq (ver em 2.3.3), Westergaard (ver em 2.3.5), “Multiple Layer” (múltiplas camadas) e Espriamento (ver em 2.3.6) com taxa de 2V:1H, como mostrado na Figura 47 (“stress computation method”).

**Figura 48 - Métodos de computação das tensões.**

The screenshot shows the 'Project Settings' dialog box with the 'General' tab selected. On the left, a tree view lists 'General', 'Stages', 'Soil Profiles', 'Groundwater', 'Cone Penetration Test (CPT)', 'Liquefaction', 'Advanced', and 'Project Summary'. The main area is titled 'General' and contains the following settings:

- Stress Computation Method:**
  - Boussinesq
  - Westergaard
  - Multiple Layer
  - Vertical Ratio (2:1)
  - Vertical Ratio (angle)
- Angle:** 26.56 °
- Units:**
  - Stress: Metric, stress as kPa
  - Settlement: Meters
- Time-dependent Consolidation Analysis
- Time Units:** Days
- Permeability Units:** meters/second

Buttons for 'OK' and 'Cancel' are located at the bottom right.

Fonte: Autor.

#### 4.3.2 Metodologia de cálculo de recalques

Para o cálculo do recalque foi considerado o tipo “non-linear” (não-linear; ver Figura 48) de material, cujo método utilizado para cálculo do adensamento primário é similar ao apresentado em 2.4.2.1.

**Figura 49 - Método de cálculo de recalques.**

The screenshot shows the 'Primary Consolidation' tab of the 'Project Settings' dialog box. The 'Primary Consolidation' checkbox is checked. The 'Material Type' is set to 'Non-Linear'. The following parameters are defined:

- Material Type:** Non-Linear
- Cc:** 0.3
- Cr:** 0.1
- e<sub>0</sub>:** 1.1
- P<sub>c</sub> (kPa):** 100
- OCR:** 1
- OCM (kPa):** 0

**Time-dependent Consolidation Analysis:**

- C<sub>v</sub> (m<sup>2</sup>/s): 1e-007
- K (m/s): 1e-009
- C<sub>vr</sub> (m<sup>2</sup>/s):** 1e-007
- K<sub>r</sub> (m/s):** 1e-009
- B-bar:** 1

A 'Variable K...' button is visible at the bottom right.

$C_c$  é o índice de compressão;  $C_r$  é o índice de recompressão;  $e_0$  é o índice de vazios inicial;  $OCR$  é a razão de sobreadensamento

Fonte: Autor.

O aterro experimental I foi modelado integralmente, sendo suas seções consideradas “embankments loads” (carregamento de aterro) e as bermas modeladas como “poligonal load” (carregamento poligonal) já que o programa não aceita aterros triangulares. Também foram consideradas as etapas de construção do aterro, bem como as características físicas do material do aterro e do solo mole.

Já o aterro experimental II foi analisado por seções para verificar a influência dos drenos verticais. Foram implantados drenos verticais nas seções que os possuíam até a profundidade final da camada de argila. Da mesma forma que o aterro anterior, foram consideradas as etapas de construção do aterro, de acordo com as datas de construção apresentadas nas Figuras 38 a 44.

## 5 RESULTADOS E ANÁLISES

Neste capítulo são descritos e analisados os resultados dos cálculos de recalque no tempo a partir dos métodos analíticos e da modelagem no SETTLE 3D<sup>®</sup> (ver Capítulo 4), e comparados os resultados com as curvas de recalque no tempo obtidas na instrumentação de campo.

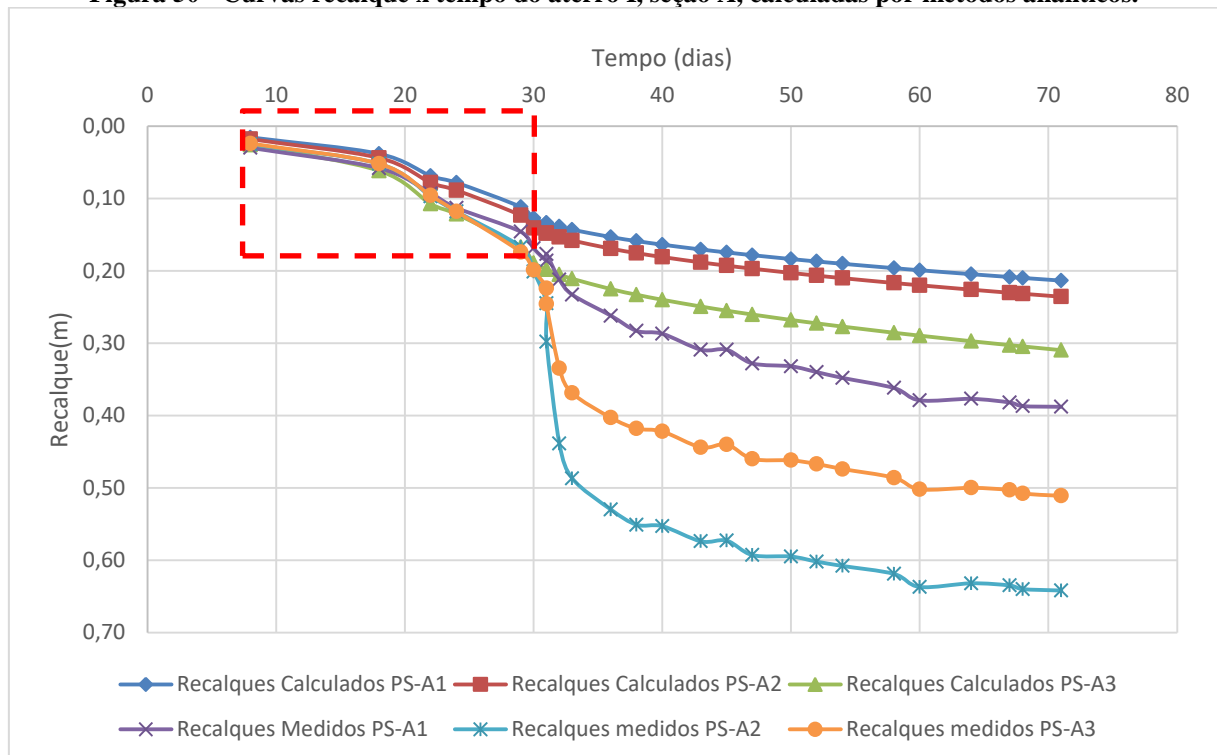
### 5.1 Aterro Experimental I

#### 5.1.1 Métodos analíticos:

Quando aplicados os métodos analíticos, a curva de recalque no tempo para as seções do aterro apresentaram-se como nos Figura 49, 50 e 51:

Nas curvas medidas para as três seções, é visível o rápido desenvolvimento de recalques entre os dias 25 a 30, comportamento característico do rompimento de aterros. Aos 25 dias o aterro apresentou a primeira fissura, mas continuou sendo carregado até os 30 dias, quando ocorreu a ruptura do aterro caracterizada pelo levantamento do pé do talude.

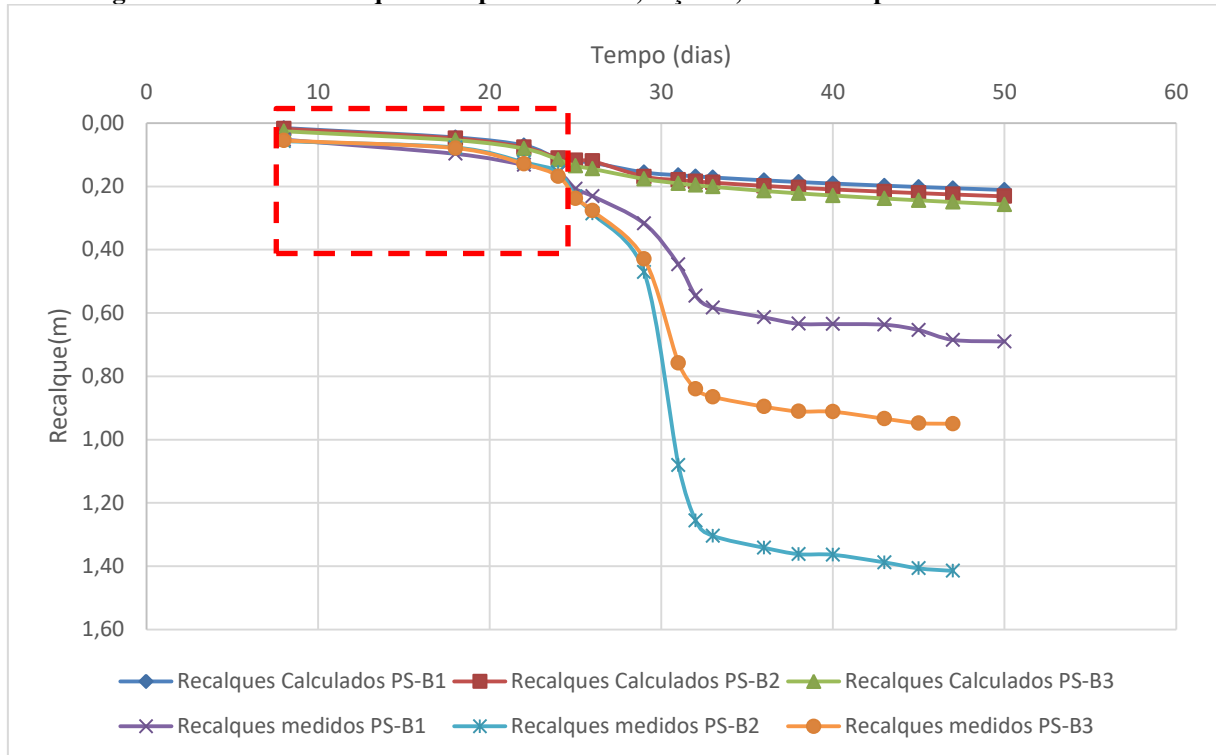
Figura 50 - Curvas recalque x tempo do aterro I, seção A, calculadas por métodos analíticos.



PS-A(nº) = posição em que foi colocada a placa de recalque PS-A(nº)

Fonte: Autor.

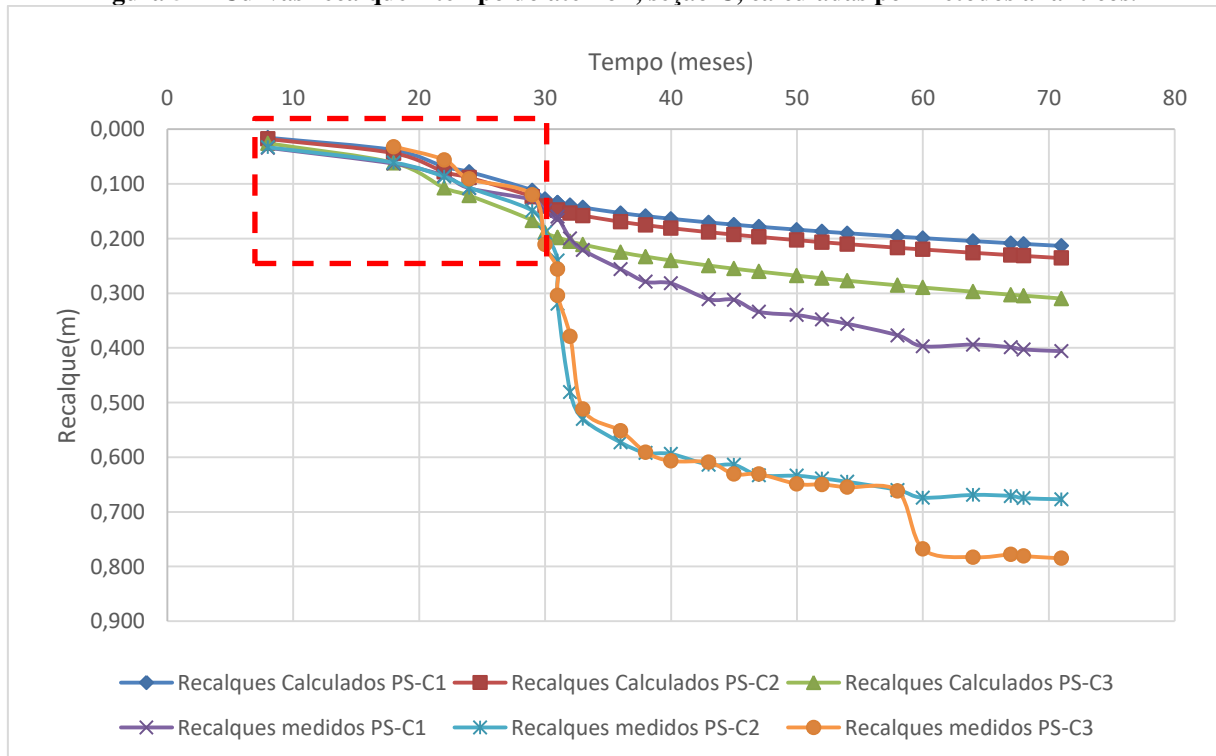
**Figura 51 - Curvas recalque x tempo do aterro I, seção B, calculadas por métodos analíticos.**



PS-B(nº) = posição em que foi colocada a placa de recalque PS-B(nº)

Fonte: Autor.

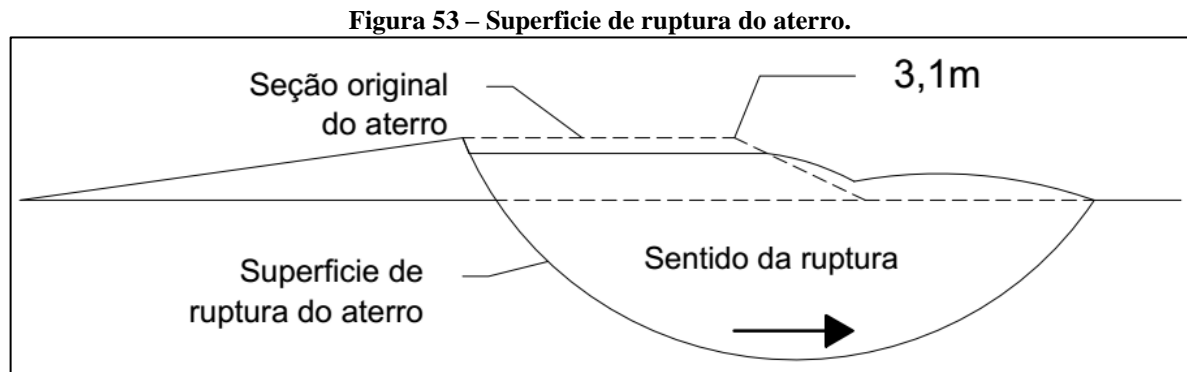
**Figura 52 - Curvas recalque x tempo do aterro I, seção C, calculadas por métodos analíticos.**



PS-C(nº) = posição em que foi colocada a placa de recalque PS-C(nº)

Fonte: Autor.

O afastamento das curvas a partir do dia 25 é decorrente da ruptura do aterro que aconteceu com o grau de adensamento entre 9 e 13%, caracterizando uma ruptura não drenada (ver Figura 53). Isso ocorreu devido ao rápido carregamento do aterro, sem esperar a dissipação das poropressões, impedindo que o solo ganhasse resistência.



Fonte: Adaptado de Ortigão, 1980, p. 226.

A Teoria do Adensamento não tem como finalidade prever o rompimento do aterro. Uma das hipóteses básicas desta teoria é que a argila está lateralmente confinada, como mostrado em 2.4.2.2. Entretanto, quando o aterro rompe ele deixa de atender a essa hipótese e a teoria do adensamento não pode mais ser aplicada. A ruptura do aterro é prevista por outros métodos que não são o foco deste trabalho.

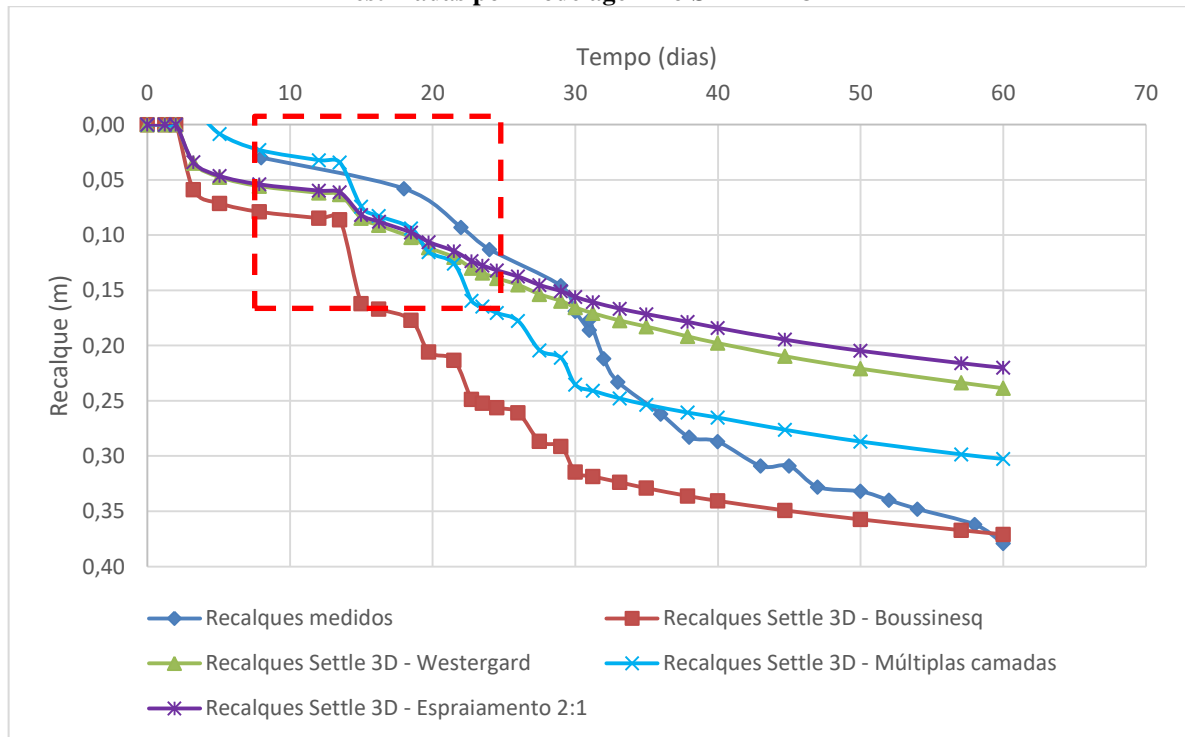
Sendo assim, só pode-se realizar uma comparação justa entre a medição e os cálculos antes da ruptura do aterro, parte indicada nas Figuras 49 a 51 pela linha tracejada. Entretanto, devido à boa aproximação antes da ruptura, seria razoável dizer que os recalques apresentados nas curvas calculadas representam os recalques que seriam desenvolvidos caso o aterro não tivesse rompido.

Um fenômeno que vale ser analisado aqui é o fato de os recalques calculados para o centro do aterro terem sido menores que os calculados mais próximos à borda talude de ruptura. Isso pode ser causado por erro de aproximação do método utilizado para o cálculo das tensões ou ser fruto da diferença de inclinação entre o talude de ruptura, maior inclinação (1V:2H), e o talude estável, menor inclinação (1V:6H), pelo talude com maior inclinação representar menos carga.

### 5.1.2 SETTLE 3D®

Os resultados obtidos com o SETTLE 3D® para o aterro experimental I podem ser observados nas Figuras 52 a 60.

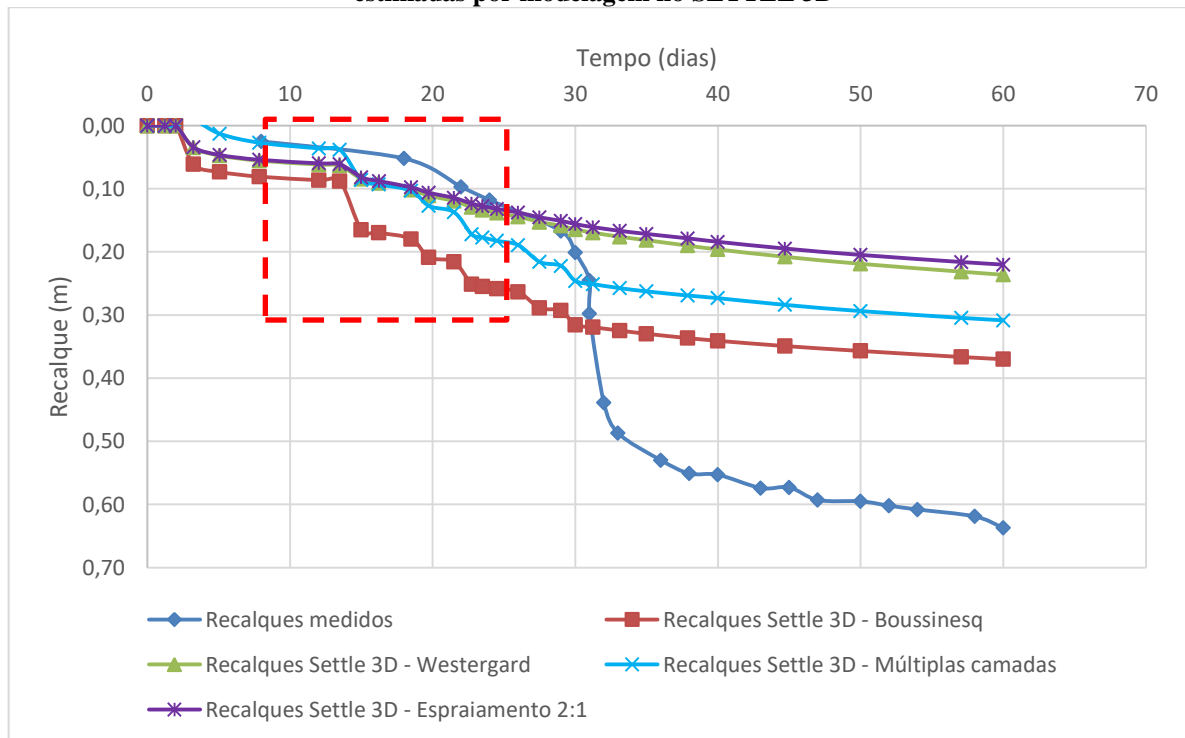
**Figura 54 - Curvas recalque x tempo do aterro I, seção A, posição equivalente à placa de recalque PS-A1 estimadas por modelagem no SETTLE 3D®**



A-1= posição em que foi colocada a placa de recalque PS-A1

Fonte: Autor.

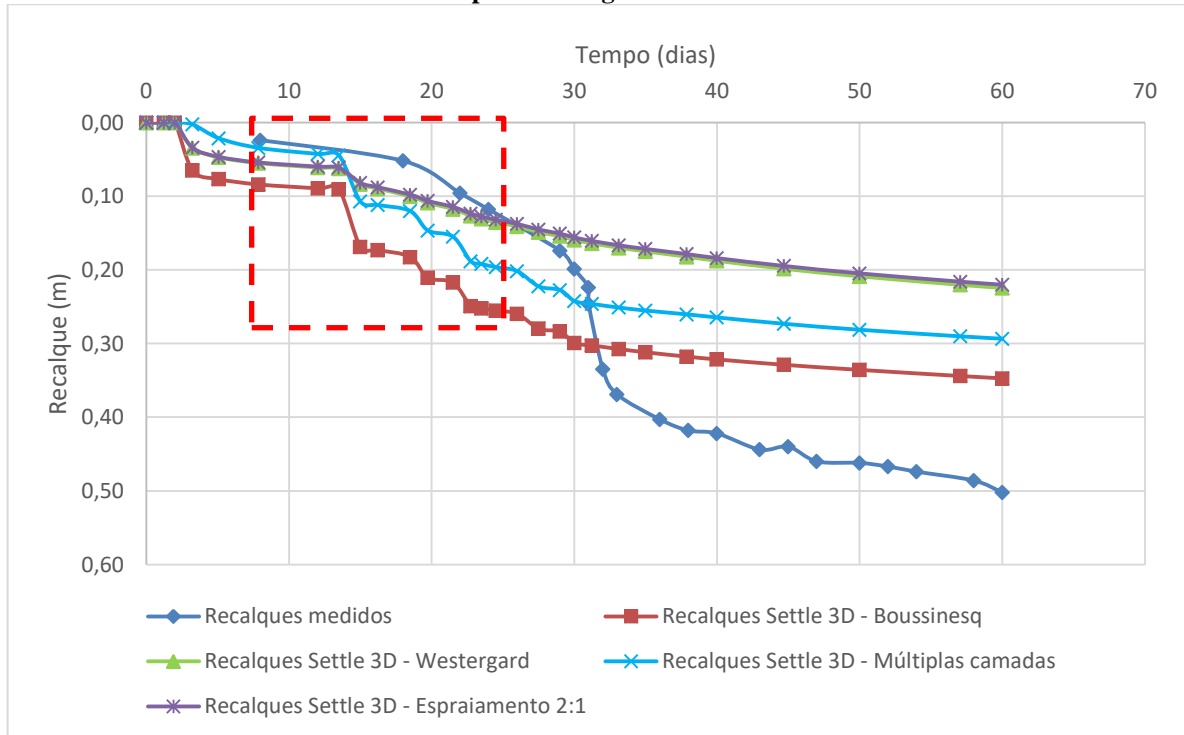
**Figura 55 - Curvas recalque x tempo do aterro I, seção A, posição equivalente à placa de recalque PS-A2 estimadas por modelagem no SETTLE 3D®**



A-2= posição em que foi colocada a placa de recalque PS-A2

Fonte: Autor.

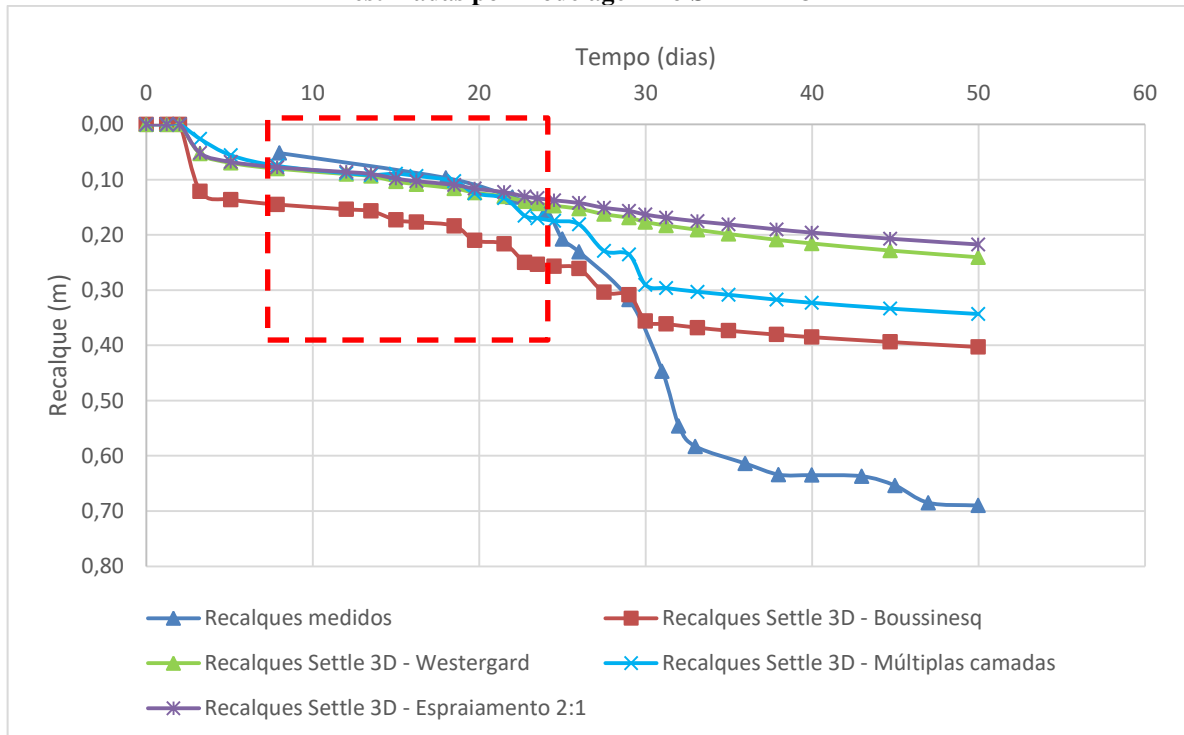
**Figura 56 - Curvas recalque x tempo do aterro I, seção A, posição equivalente à placa de recalque PS-A3 estimadas por modelagem no SETTLE 3D®**



A-3= posição em que foi colocada a placa de recalque PS-A3

Fonte: Autor.

**Figura 57 - Curvas recalque x tempo do aterro I, seção B, posição equivalente à placa de recalque PS-B1 estimadas por modelagem no SETTLE 3D®**

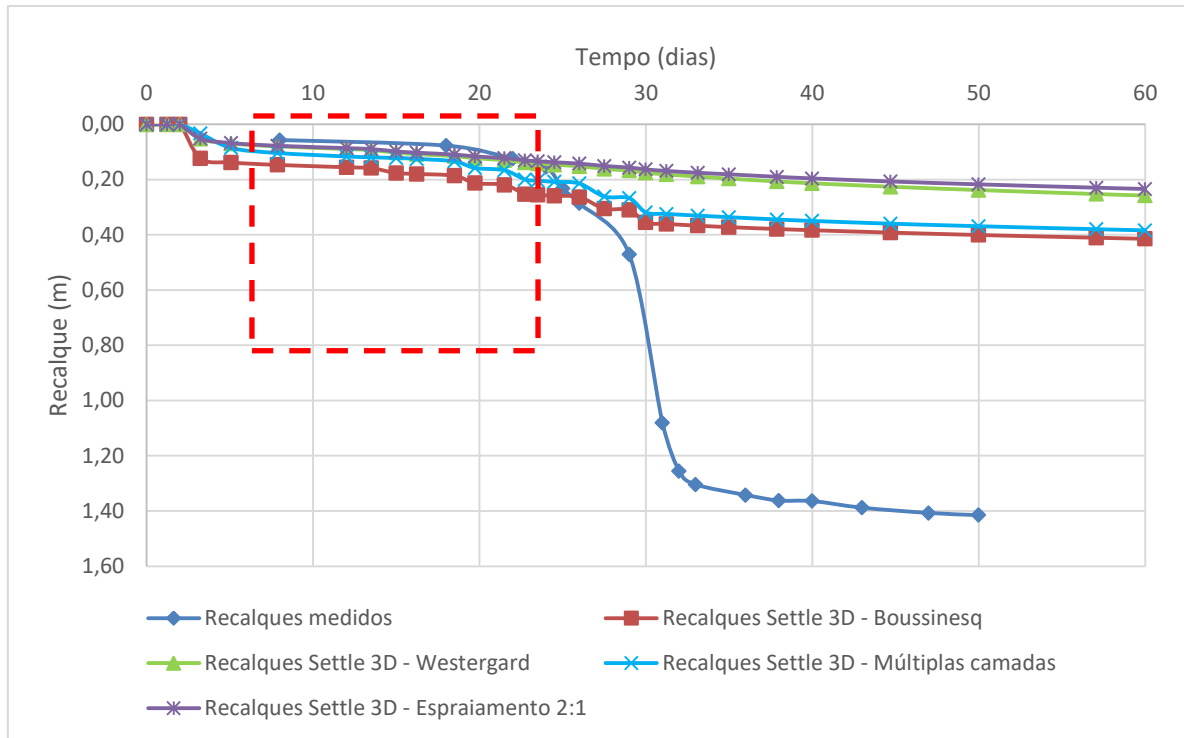


B-1= posição em que foi colocada a placa de recalque PS-B1

Fonte: Autor.



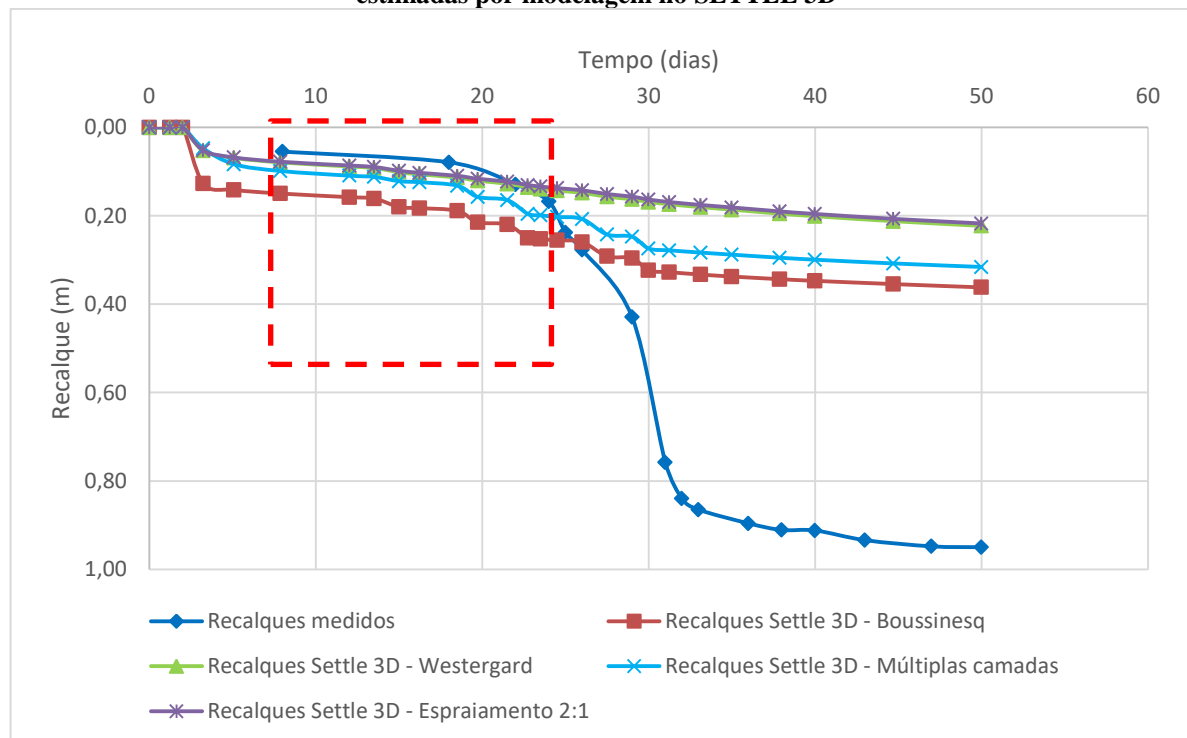
**Figura 58 - Curvas recalque x tempo do aterro I, seção B, posição equivalente à placa de recalque PS-B2 estimadas por modelagem no SETTLE 3D®**



B-2= posição em que foi colocada a placa de recalque PS- B2

Fonte: Autor.

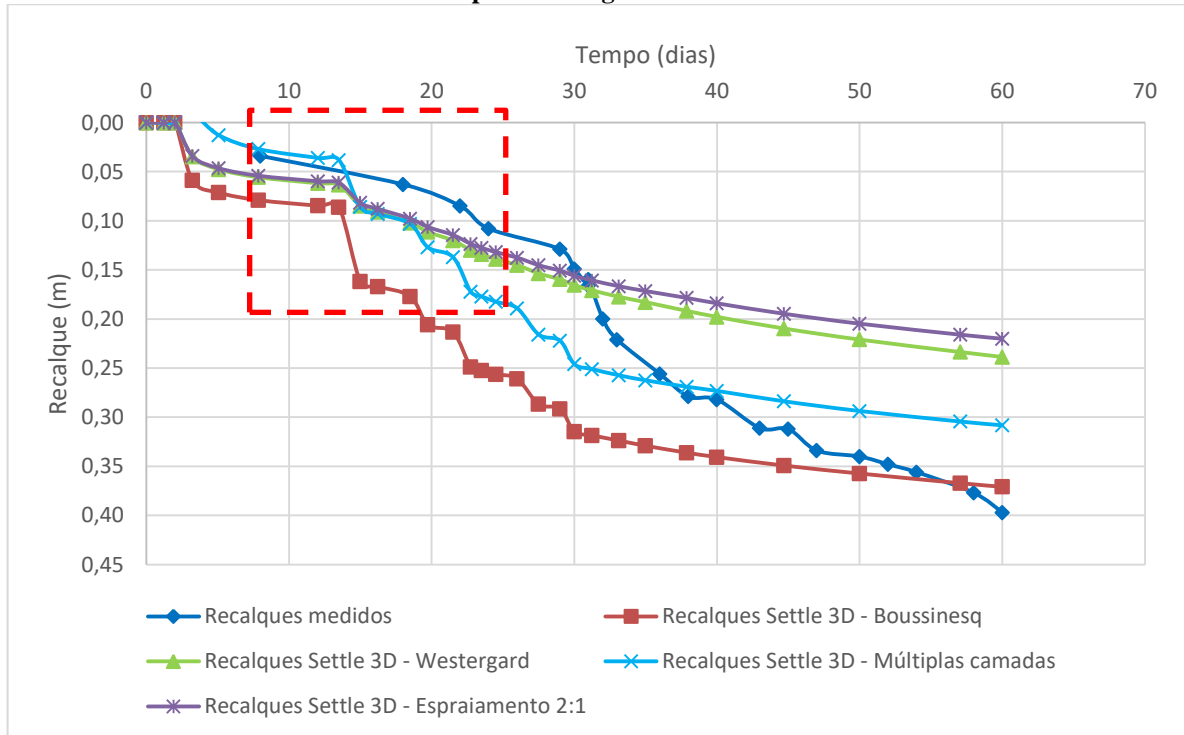
**Figura 59 - Curvas recalque x tempo do aterro I, seção B, posição equivalente à placa de recalque PS-B3 estimadas por modelagem no SETTLE 3D®**



B-3= posição em que foi colocada a placa de recalque PS- B3

Fonte: Autor.

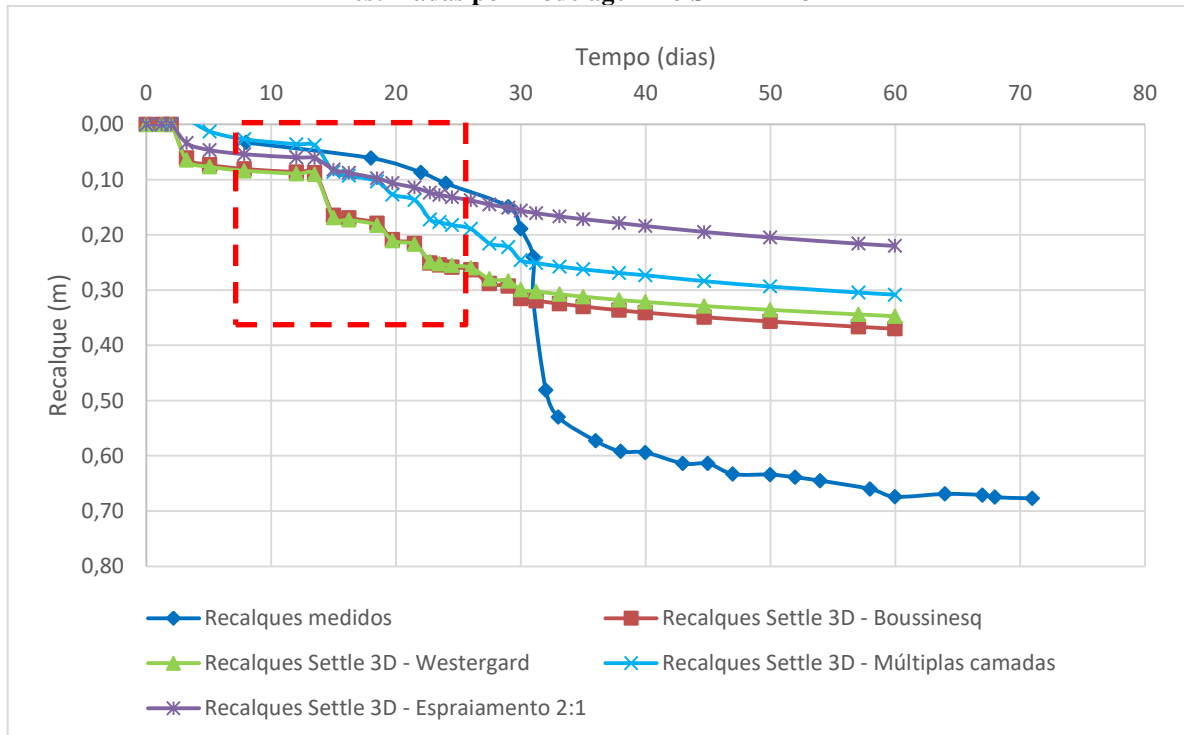
**Figura 60 - Curvas recalque x tempo do aterro I, seção C, posição equivalente à placa de recalque PS-C1 estimadas por modelagem no SETTLE 3D®**



C-1= posição em que foi colocada a placa de recalque PS- C1

Fonte: Autor.

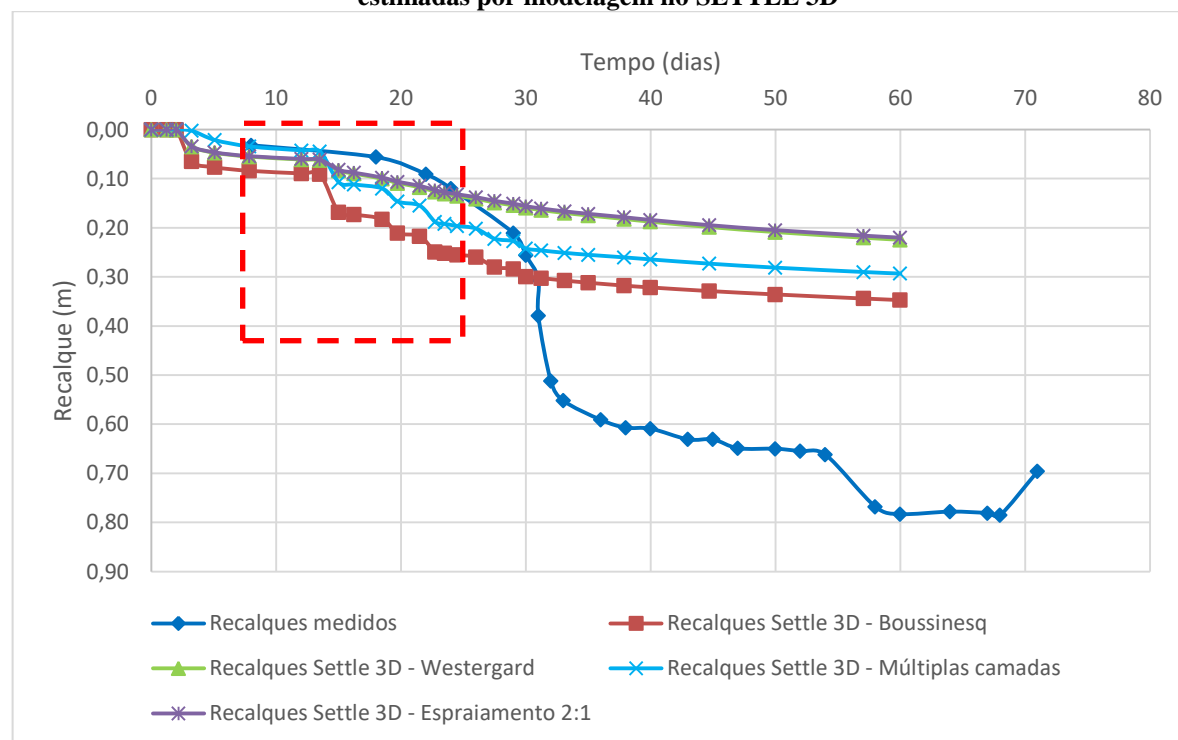
**Figura 61 - Curvas recalque x tempo do aterro I, seção C, posição equivalente à placa de recalque PS-C2 estimadas por modelagem no SETTLE 3D®**



C-2= posição em que foi colocada a placa de recalque PS- C2

Fonte: Autor.

**Figura 62 - Curvas recalque x tempo do aterro I, seção C, posição equivalente à placa de recalque PS-C3 estimadas por modelagem no SETTLE 3D®**



C-3= posição em que foi colocada a placa de recalque PS- C3

Fonte: Autor.

De forma similar aos resultados dos recalques analíticos, é possível observar a grande discrepância dos resultados a partir do dia 30, indicando a ruptura do aterro, que os métodos de cálculo de recalques não preveem.

Antes da ruptura, entretanto, é notável a proximidade dos valores calculados pelo método das múltiplas camadas com aos recalques medidos pela instrumentação (linha tracejada). Já o método de Boussinesq se mostrou bastante conservador, apresentando os maiores recalques, enquanto que os resultados pelos métodos de Westergaard e do espraiamento se mostraram muito próximos, apesar do primeiro ser mais específico, focado justamente no uso em camadas de argila, e o segundo ser bastante simplificado.

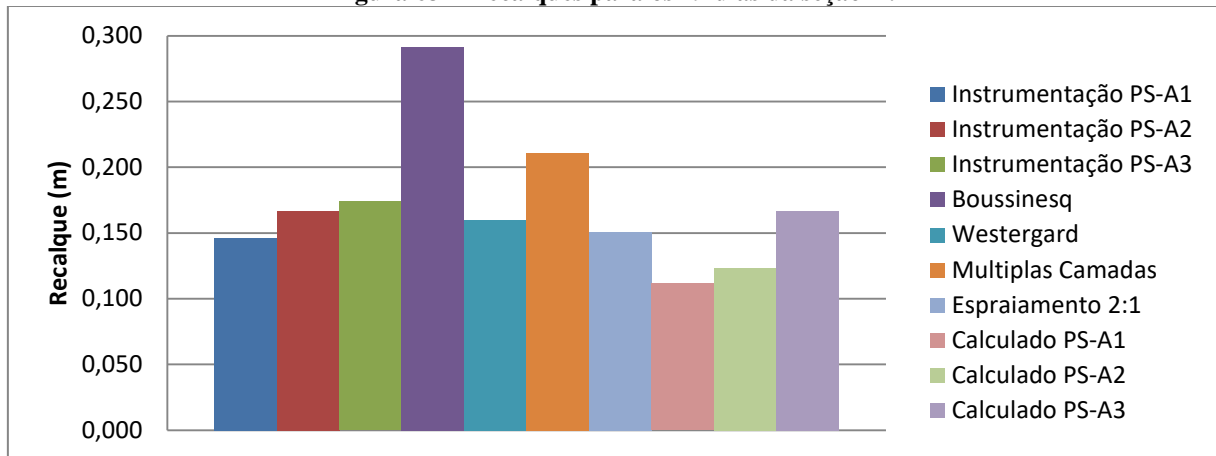
### 5.1.3 Comparação entre métodos de cálculo bidimensional e tridimensional:

Nesta seção é realizada a comparação entre os métodos de cálculo considerando os recalques até os 29 dias, quando o aterro ainda não tinha grandes recalques desenvolvidos pela ruptura. As Figuras 61, 62 e 63 mostram os recalques obtidos para as seções A B e C do aterro II pelos diferentes métodos de cálculo e pela instrumentação de campo.

É possível notar que os recalques estimados pelo programa foram maiores que os calculados analiticamente, provavelmente pela consideração do carregamento tridimensional.

Entretanto, o método de Boussinesq se mostrou muito distante dos valores reais do recalque, exceto pelos recalques da seção B, que foram mais influenciados pela ruptura do aterro.

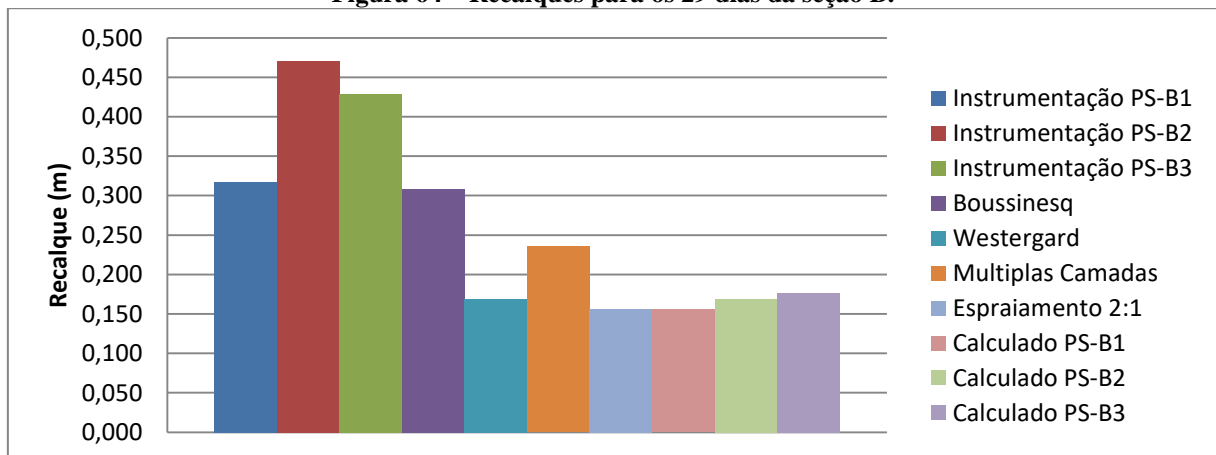
**Figura 63 – Recalques para os 29 dias da seção A.**



PS-A(nº) = posição em que foi colocada a placa de recalque PS-A(nº)

Fonte: Autor.

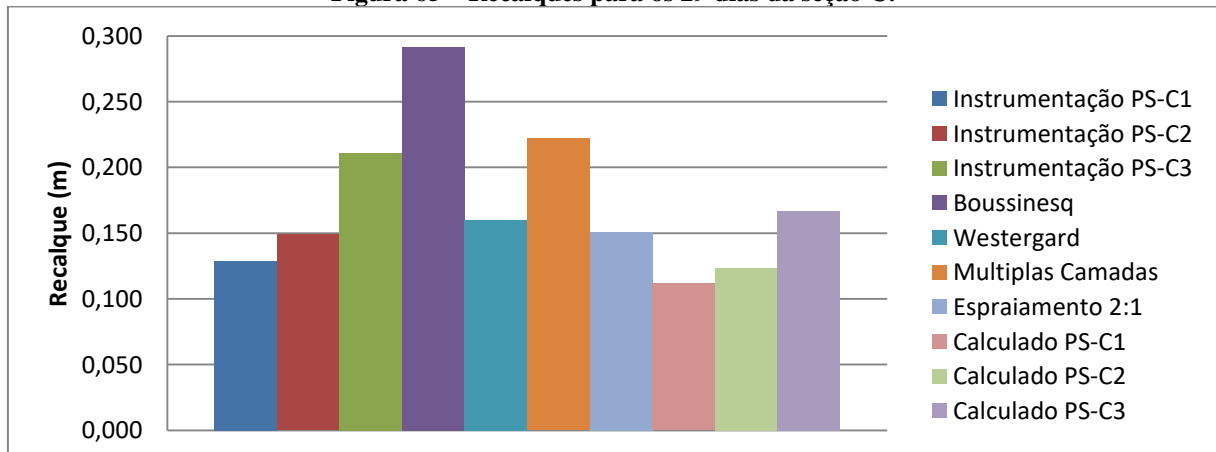
**Figura 64 – Recalques para os 29 dias da seção B.**



PS-B(nº) = posição em que foi colocada a placa de recalque PS-B(nº)

Fonte: Autor.

**Figura 65 – Recalques para os 29 dias da seção C.**



PS-C(nº) = posição em que foi colocada a placa de recalque PS-C(nº)

Fonte: Autor.

## 5.2 Aterro experimental II

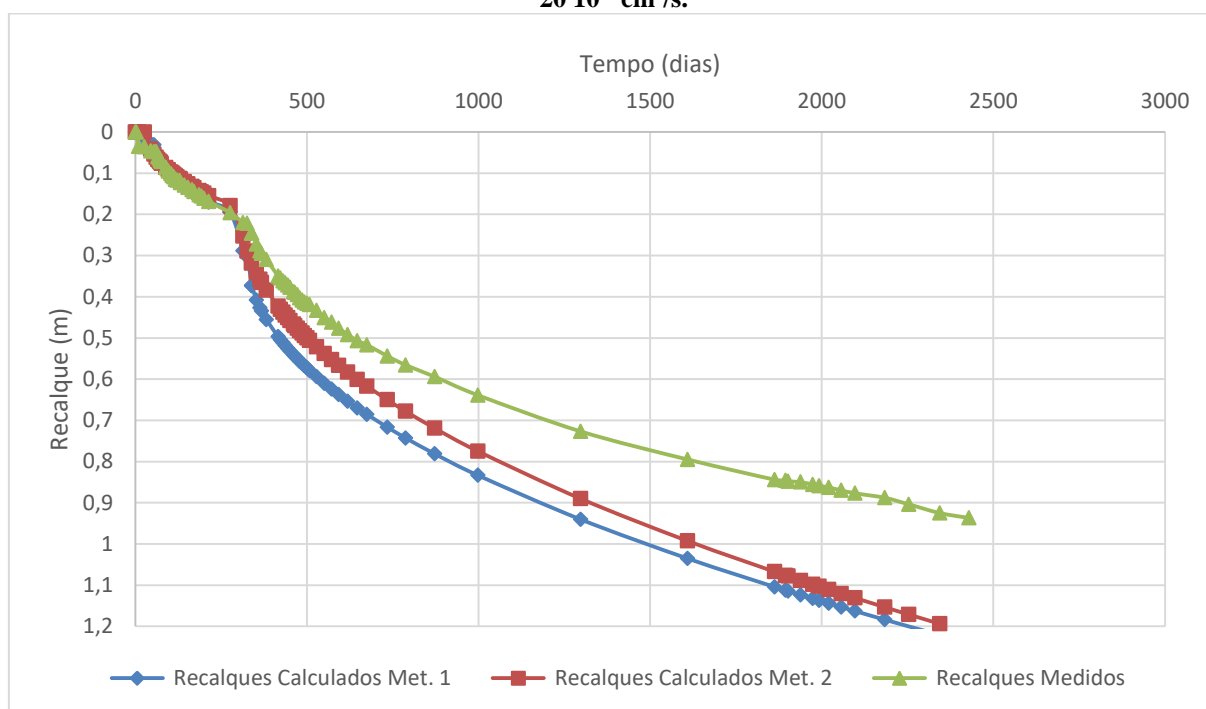
### 5.2.1 Métodos analíticos

Devido às grandes diferenças entre as seções do aterro experimental II, resolveu-se analisá-las separadamente: seções com drenos e seções sem drenos. A começar pela seção “A”, cuja curva de recalque no tempo, obtida de acordo com os métodos analíticos (ver 4.2), é apresentada na Figura 64.

Os recalques calculados se aproximam do valor do recalque medido até aproximadamente os 300 dias, quando são adicionadas novas cargas. Foi realizada uma retroanálise dos valores de coeficiente de adensamento ( $c_v$ ), utilizando como limites os valores de  $c_v$  obtidos por Ortigão para a faixa de tensão à qual o solo foi submetido (ver Apêndice A), obtiveram-se as curvas da Figura 65.

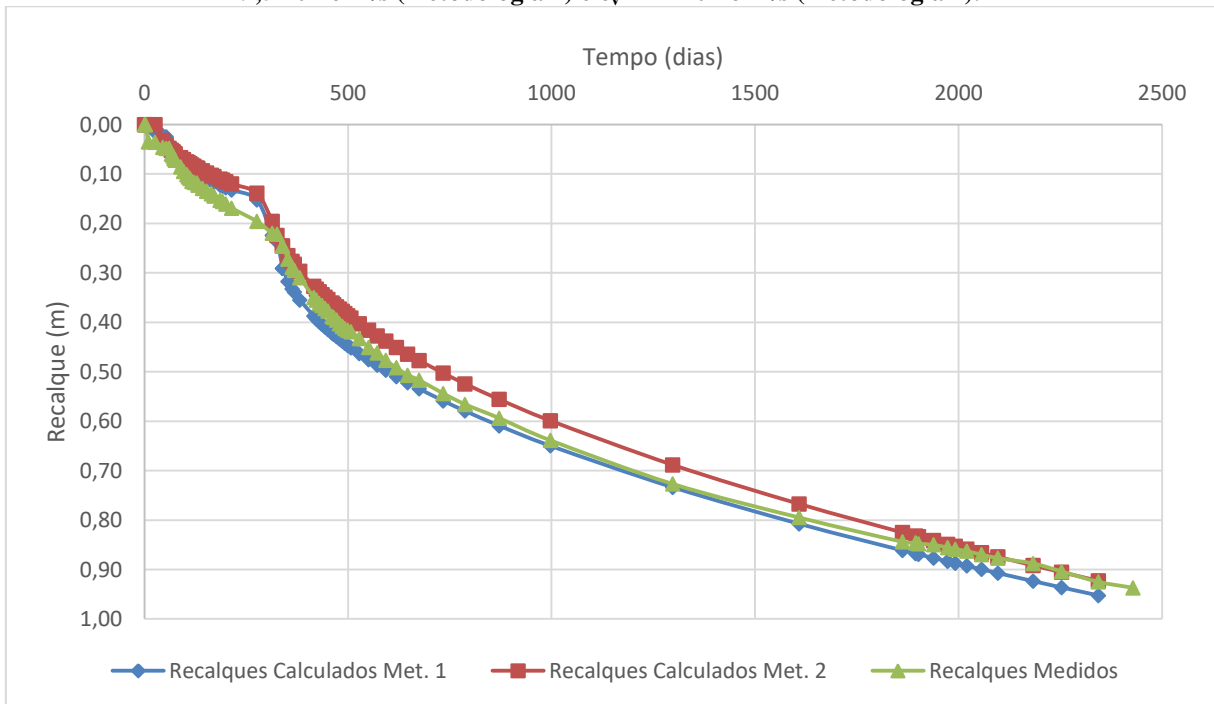
As curvas da Figura 65 apresentam o  $c_v = 9,5 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$  para a metodologia 1 e  $c_v = 12 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$  para a metodologia 2. Elas resultam em menores erros no final da curva, porém erros mais altos no início da curva. Isso acontece por que o  $c_v$  varia com a tensão aplicada de forma que quanto maior é a tensão, menor o valor de  $c_v$ .

**Figura 66 - Curvas recalque x tempo do aterro II, seção A, calculadas por métodos analíticos para  $c_v = 20 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$ .**



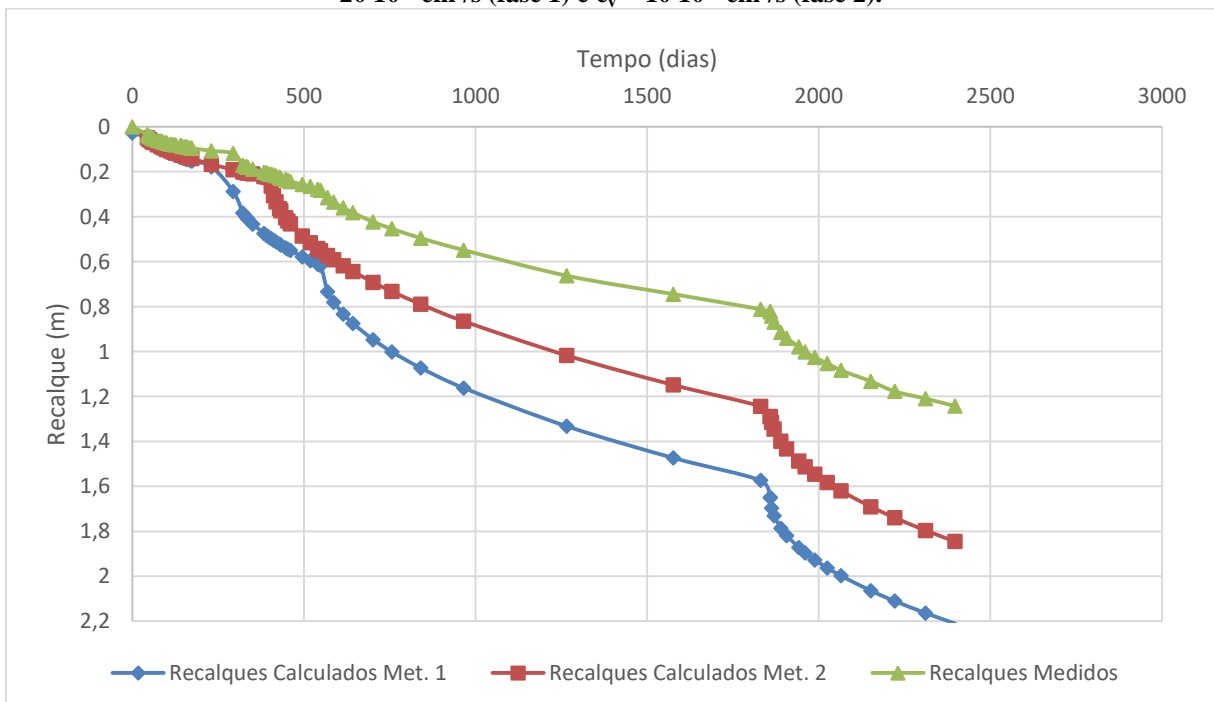
Fonte: Autor.

**Figura 67 - Curvas recalque x tempo do aterro II, seção A, calculadas por métodos analíticos para  $c_v = 9,5 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$  (metodologia 1) e  $c_v = 12 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$  (metodologia 2).**

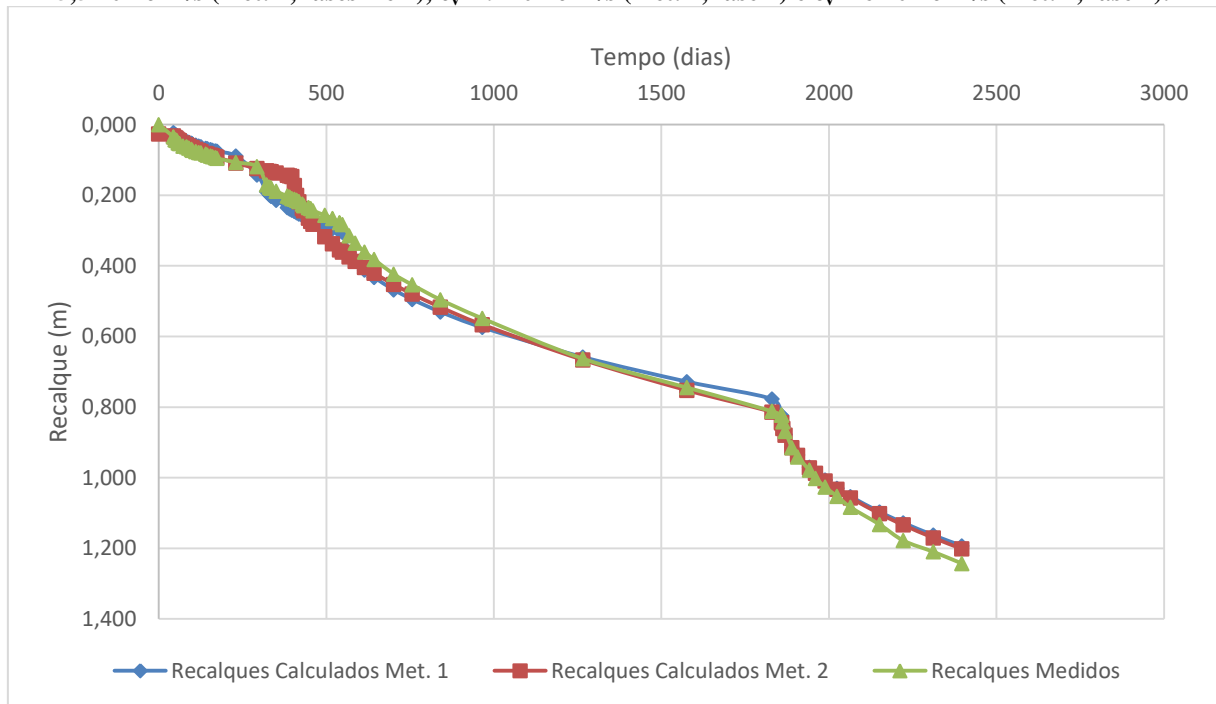


Já a curva de recalques no tempo da seção “G” pode ser visualizada nos Figura 66 . De forma similar ao que ocorre na seção A, a seção G apresenta recalques calculados muito diferentes dos recalques medidos. Assim, feita uma retroanálise do  $c_v$ , as curvas se mostraram mais próxima dos valores reais, como mostra a Figura 67.

**Figura 68 - Curvas recalque x tempo do aterro II, seção G, calculadas por métodos analíticos para  $c_v = 20 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$  (fase 1) e  $c_v = 10 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$  (fase 2).**

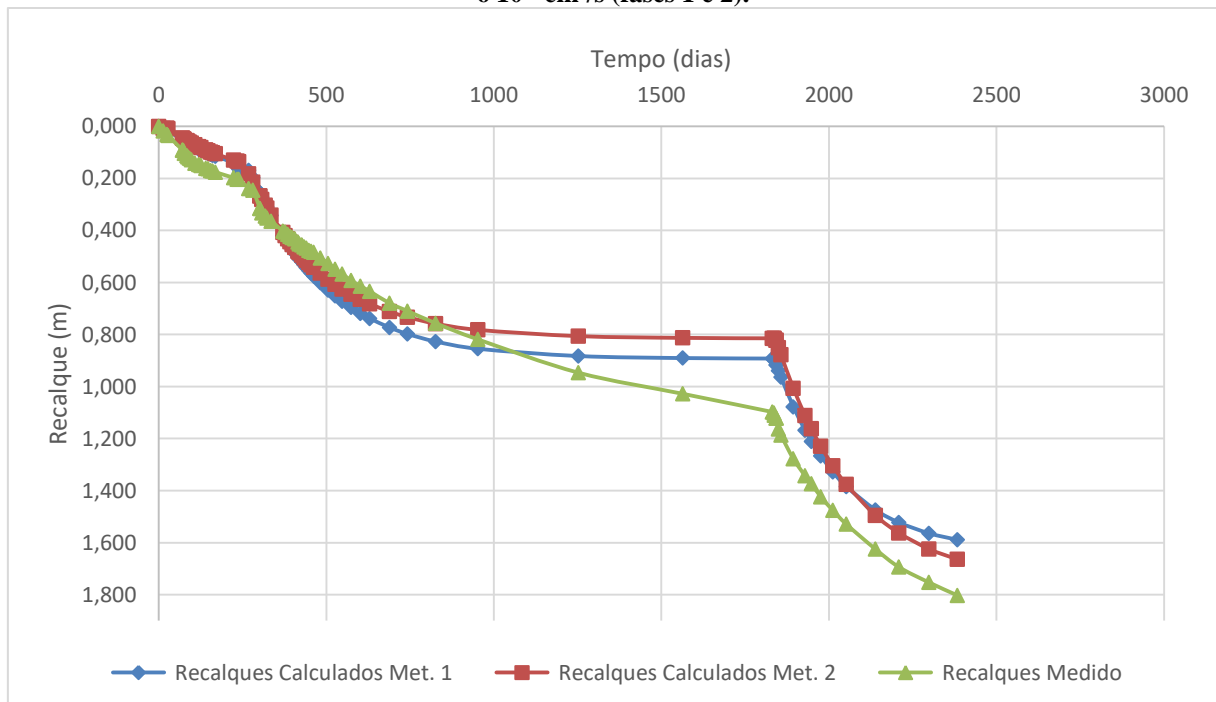


**Figura 69 - Curvas recalque x tempo do aterro II, seção G, calculadas por métodos analíticos para  $c_v = 5,5 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$  (met. 1, fases 1 e 2),  $c_v = 9 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$  (met. 2, fase 1) e  $c_v = 6 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$  (met. 2, fase 2).**

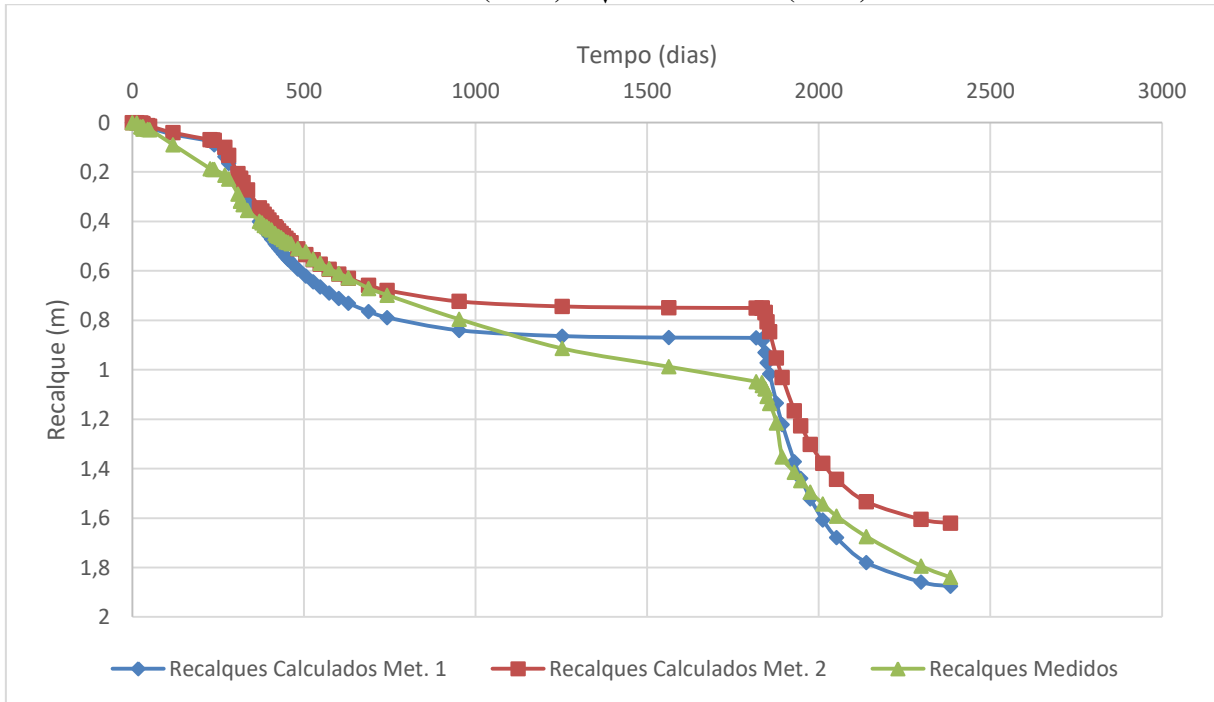


Para as seções que possuíam drenos, a partir da seção “B”, pode-se visualizar os resultados das estimativas de recalque pelas Figuras 68 a 72.

**Figura 70 - Curvas recalque x tempo do aterro II, seção B, calculadas por métodos analíticos para  $c_v = 6 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$  (fases 1 e 2).**

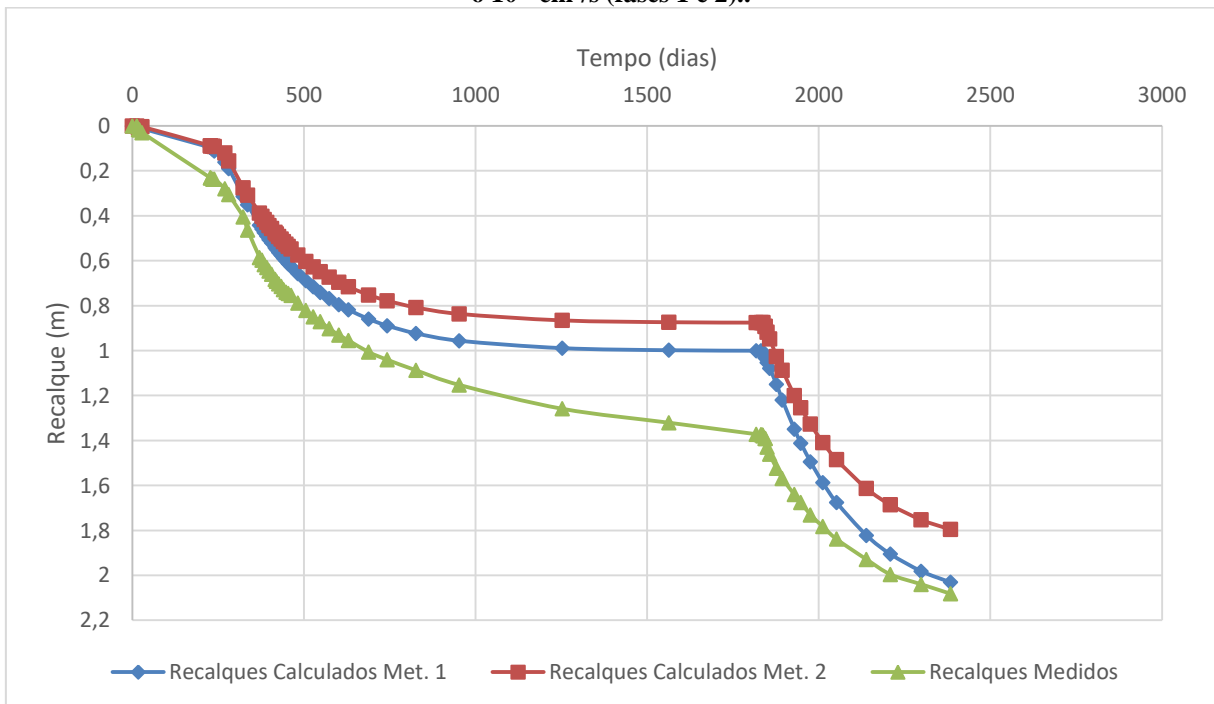


**Figura 71 - Curvas recalque x tempo do aterro II, seção C, calculadas por métodos analíticos para  $c_v = 4 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$  (fase 1) e  $c_v = 10 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$  (fase 2).**



Fonte: Autor.

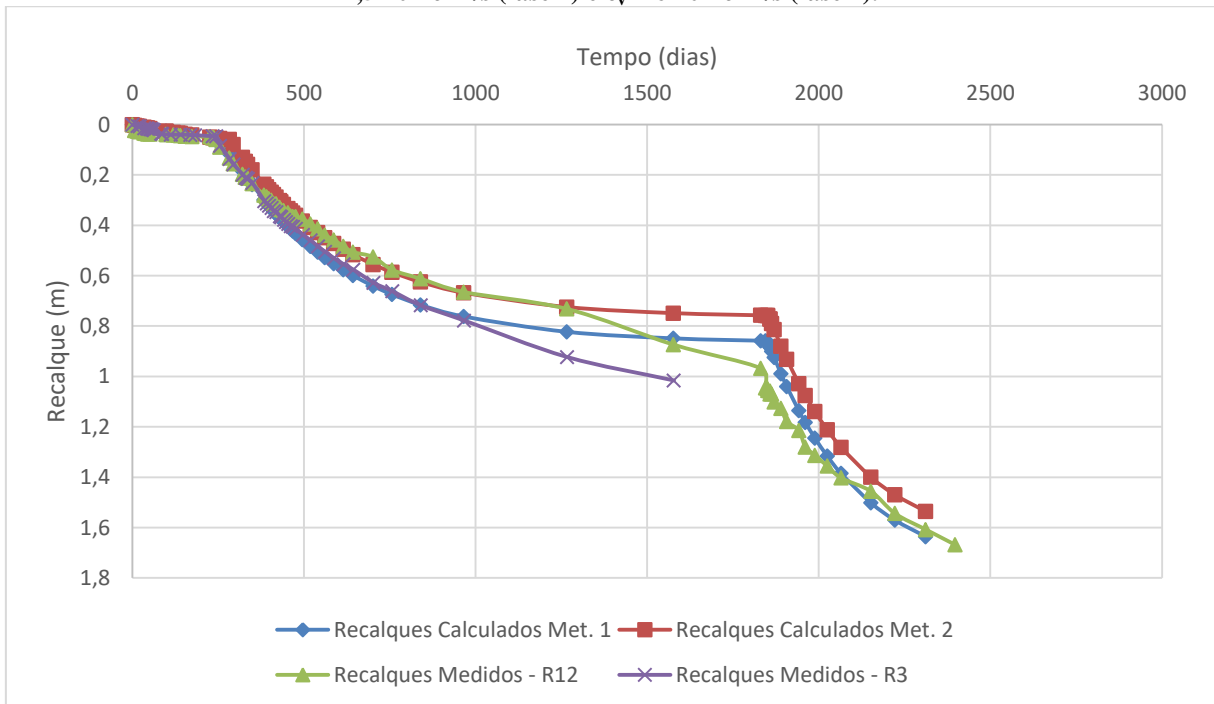
**Figura 72 - Curvas recalque x tempo do aterro II, seção D, calculadas por métodos analíticos para  $c_v = 6 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$  (fases 1 e 2)..**



Fonte: Autor.

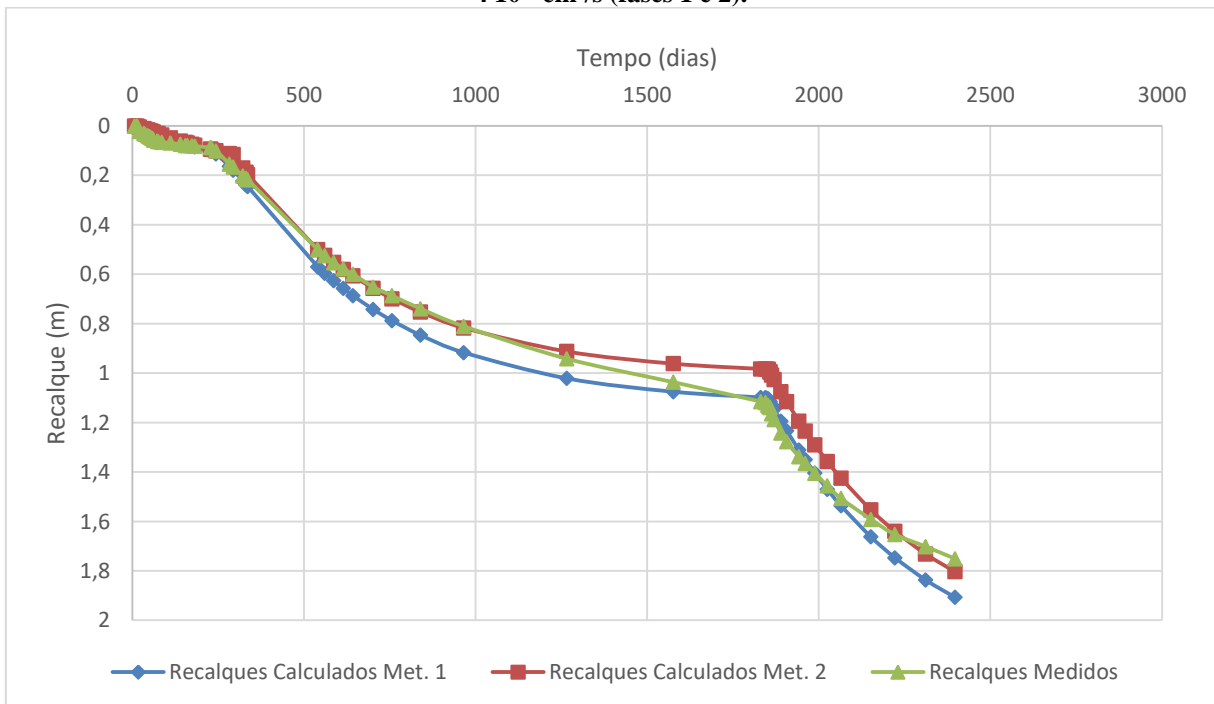


**Figura 73 - Curvas recalque x tempo do aterro II, seção E, calculadas por métodos analíticos para  $c_v = 4,5 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$  (fase 1) e  $c_v = 6 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$  (fase 2).**



Fonte: Autor.

**Figura 74 - Curvas recalque x tempo do aterro II, seção F, calculadas por métodos analíticos para  $c_v = 4 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$  (fases 1 e 2).**



Fonte: Autor.

No caso das curvas das seções B, C, D, E e F (Figuras 70 a 74), a retro análise não se justifica, pois a estabilização dos recalques nas curvas calculadas indica que os recalques estavam próximos dos recalques totais enquanto que na curva medida isso não acontece. Isso sugere que a disparidade observada entre os dias 1000 e 2000 não é um problema de

coeficiente de adensamento, que influencia na inclinação da curva, mas sim da estimativa de recalques totais.

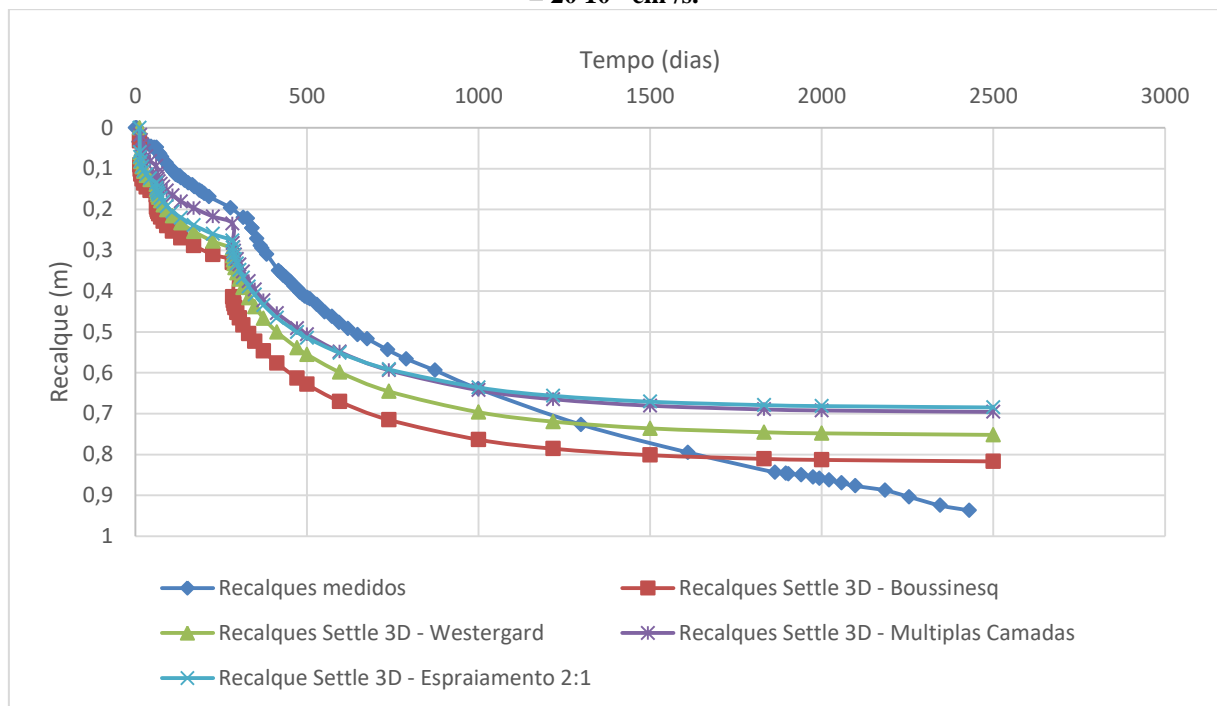
### 5.2.2 SETTLE 3D®

Quanto aos resultados do programa, são apresentadas as curvas de recalque no tempo para as seções nas Figuras 73 a 79.

É observado no início da curva um afastamento das curvas calculadas da curva obtida pela instrumentação, indicando que o coeficiente de adensamento provavelmente é mais alto no início do carregamento, como já foi discutido na seção 5.2.1. Entretanto, as curvas se afastam dos resultados reais no final, e apresentam a tendência de estabilização dos recalques.

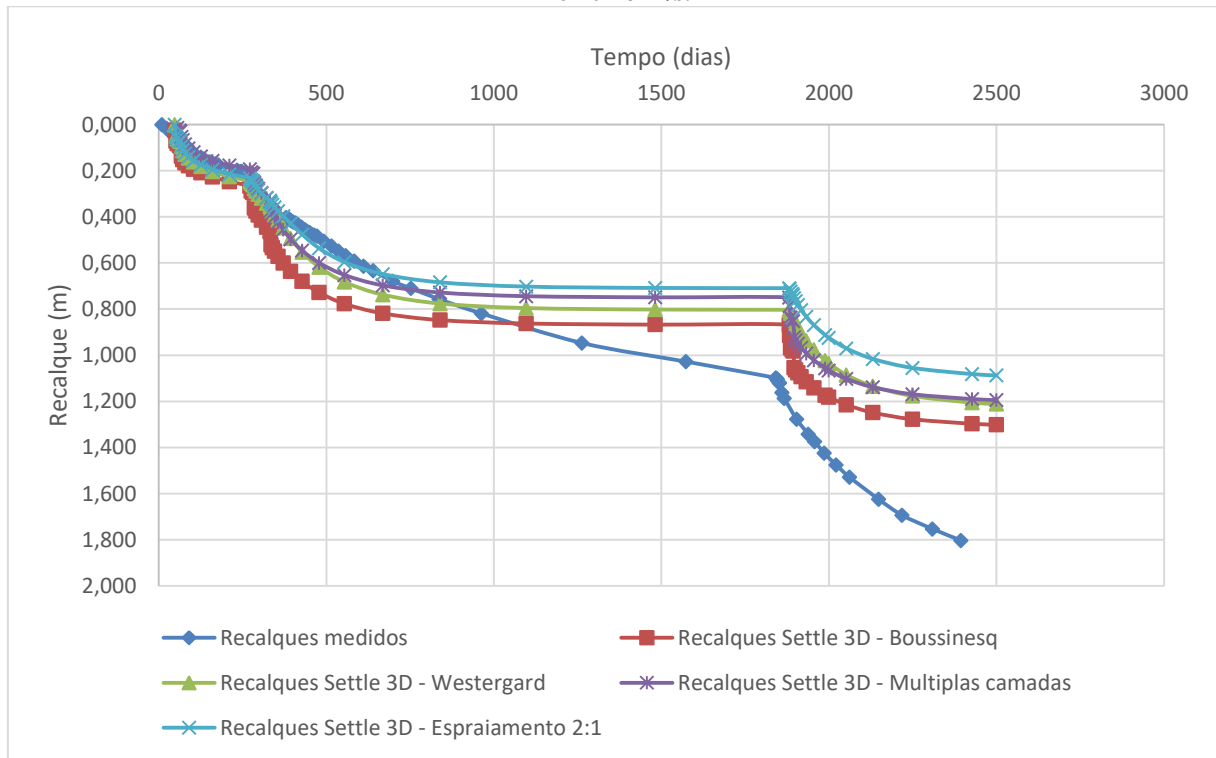
Isso pode acontecer por dois motivos: o primeiro é o fato de o programa estar calculando apenas deformação por adensamento primário; o segundo é o fato de cada seção ter sido isolada na modelagem, ou seja, o carregamento das seções B, C D, E, F e G não está sendo considerado. Os carregamentos seriam relevantes nesse caso, pois o programa trata de variáveis de forma tridimensional.

**Figura 75 - Curvas recalque x tempo do aterro II, seção A<sub>2</sub>, calculadas por métodos computacionais para  $c_v = 20 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$ .**



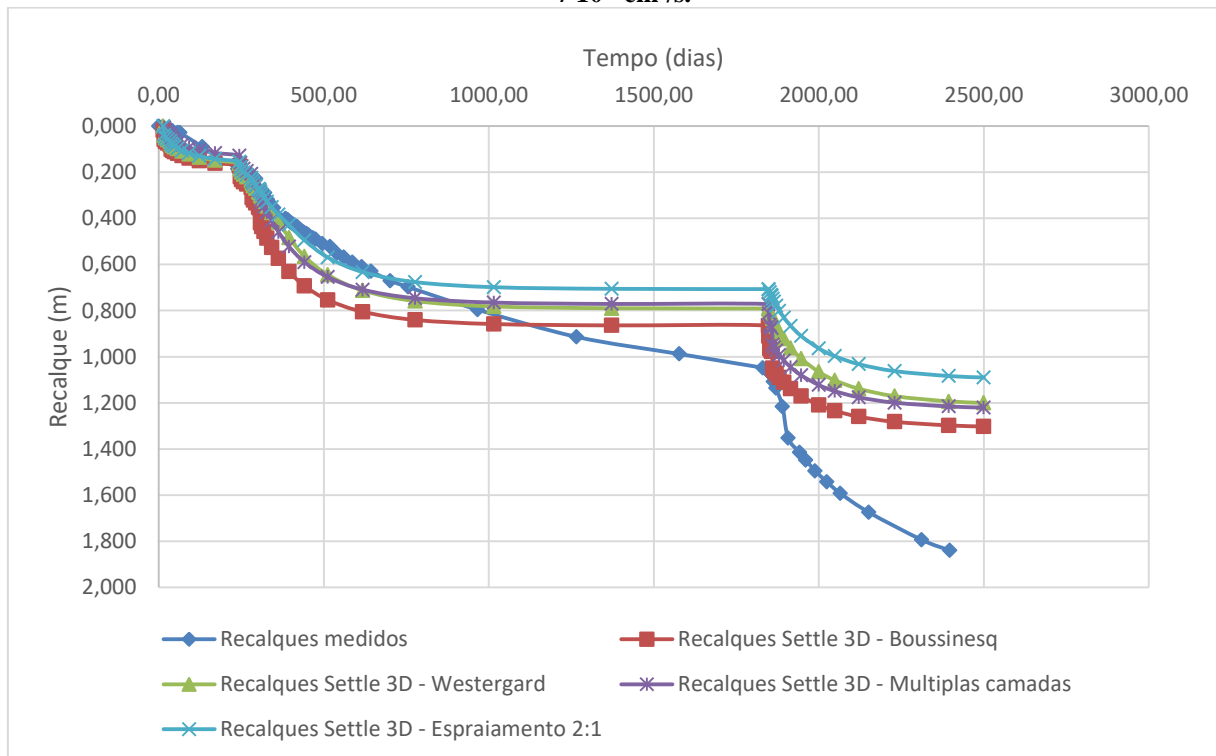
Fonte: Autor.

**Figura 76 - Curvas recalque x tempo do aterro II, seção B, calculadas por métodos computacionais para  $c_v = 6 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$ .**



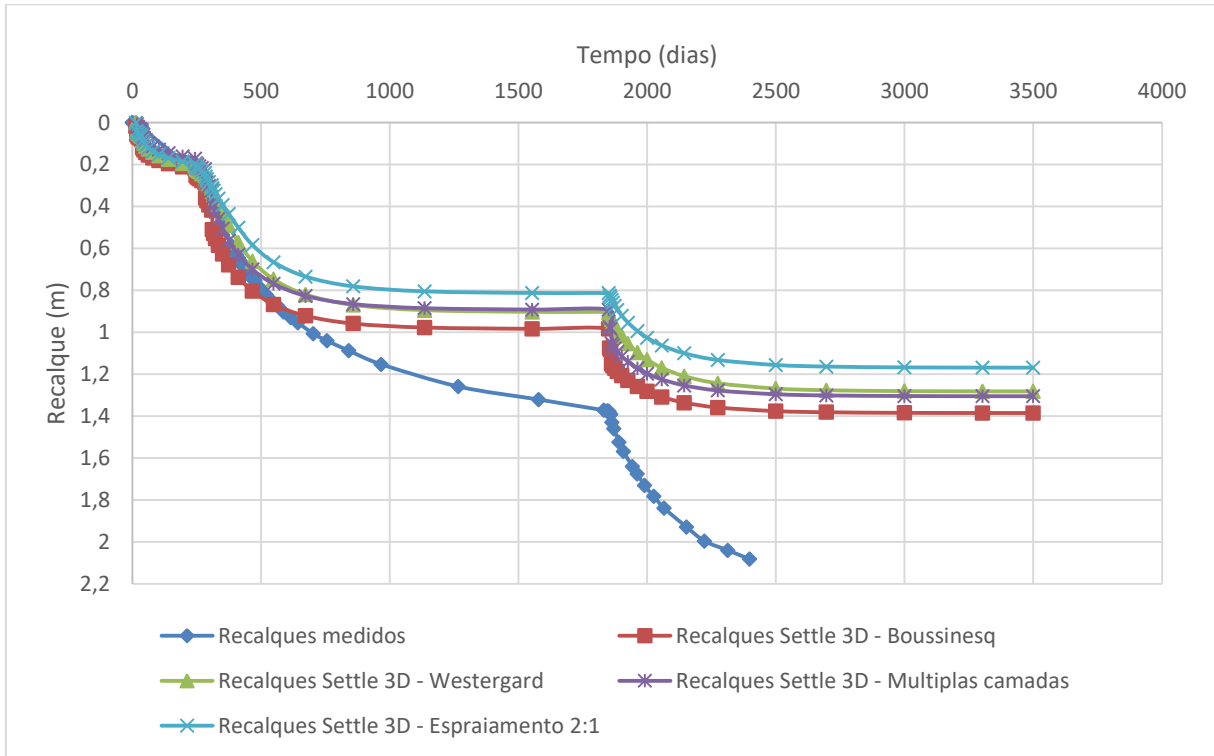
Fonte: Autor.

**Figura 77 - Curvas recalque x tempo do aterro II, seção C, calculadas por métodos computacionais para  $c_v = 7 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$ .**



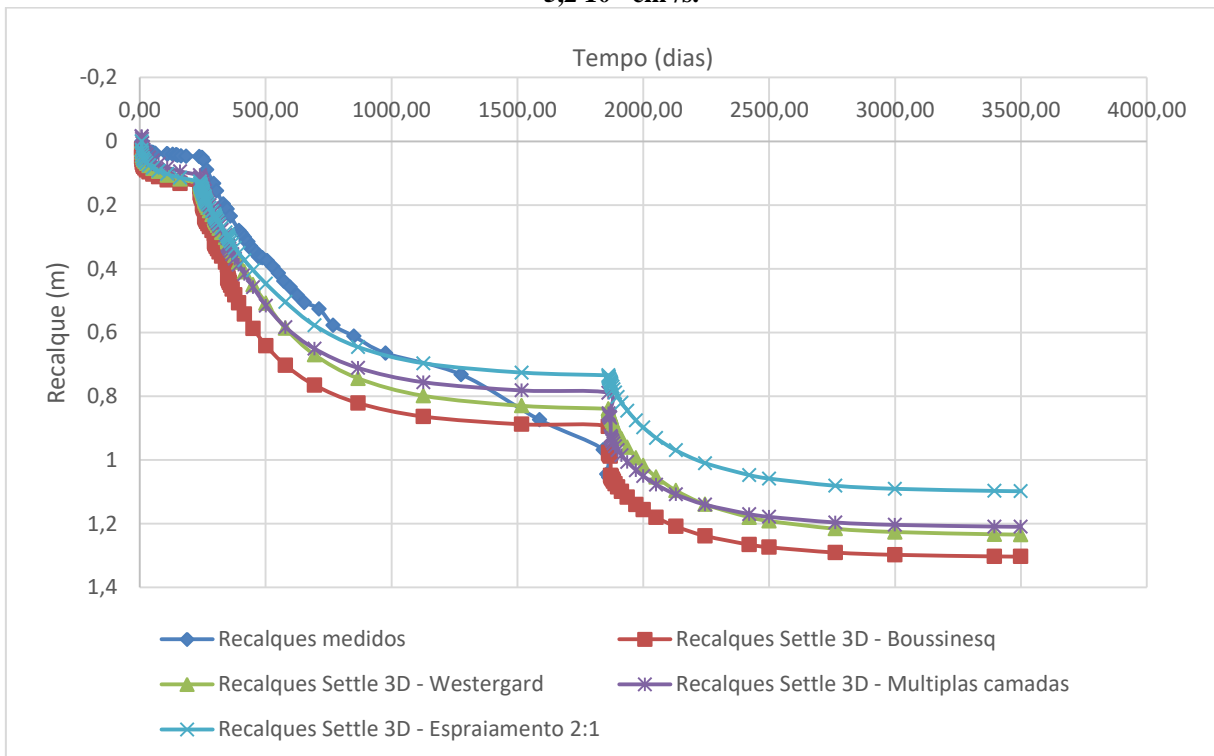
Fonte: Autor.

**Figura 78 - Curvas recalque x tempo do aterro II, seção D, calculadas por métodos computacionais para  $c_v = 6 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$ .**



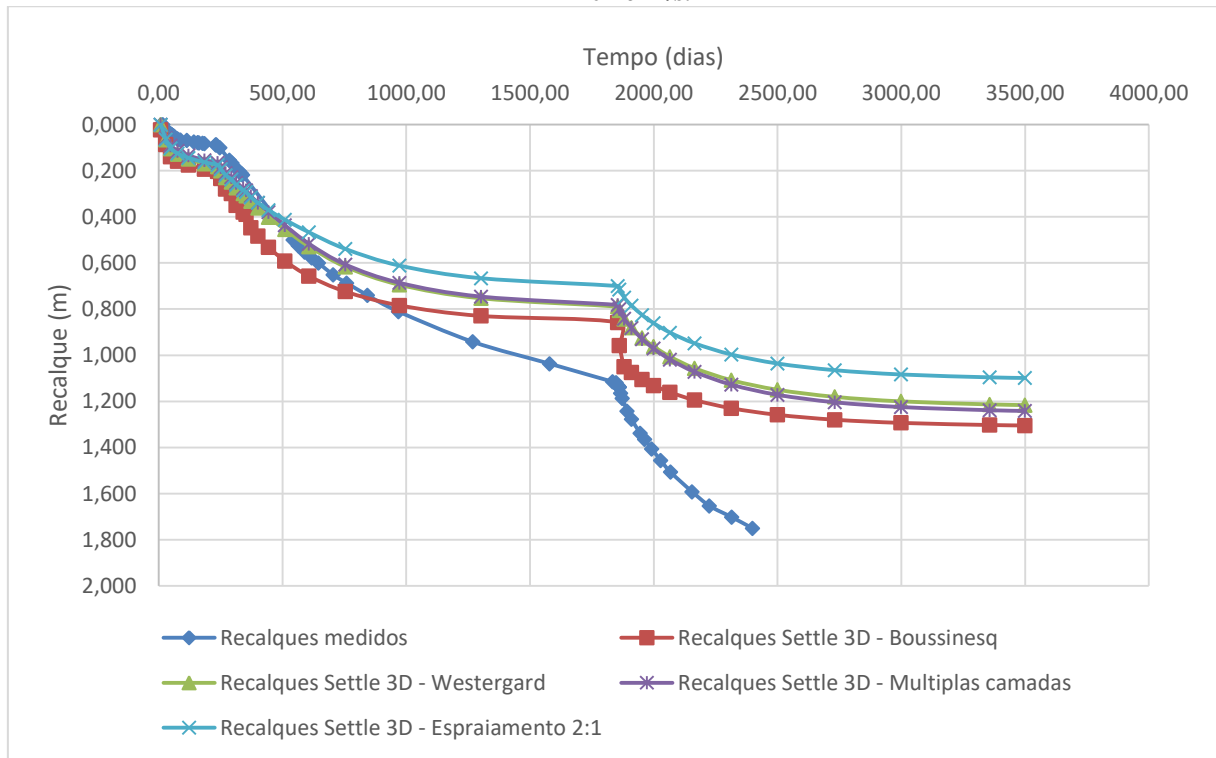
Fonte: Autor.

**Figura 79 - Curvas recalque x tempo do aterro II, seção E, calculadas por métodos computacionais para  $c_v = 5,2 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$ .**



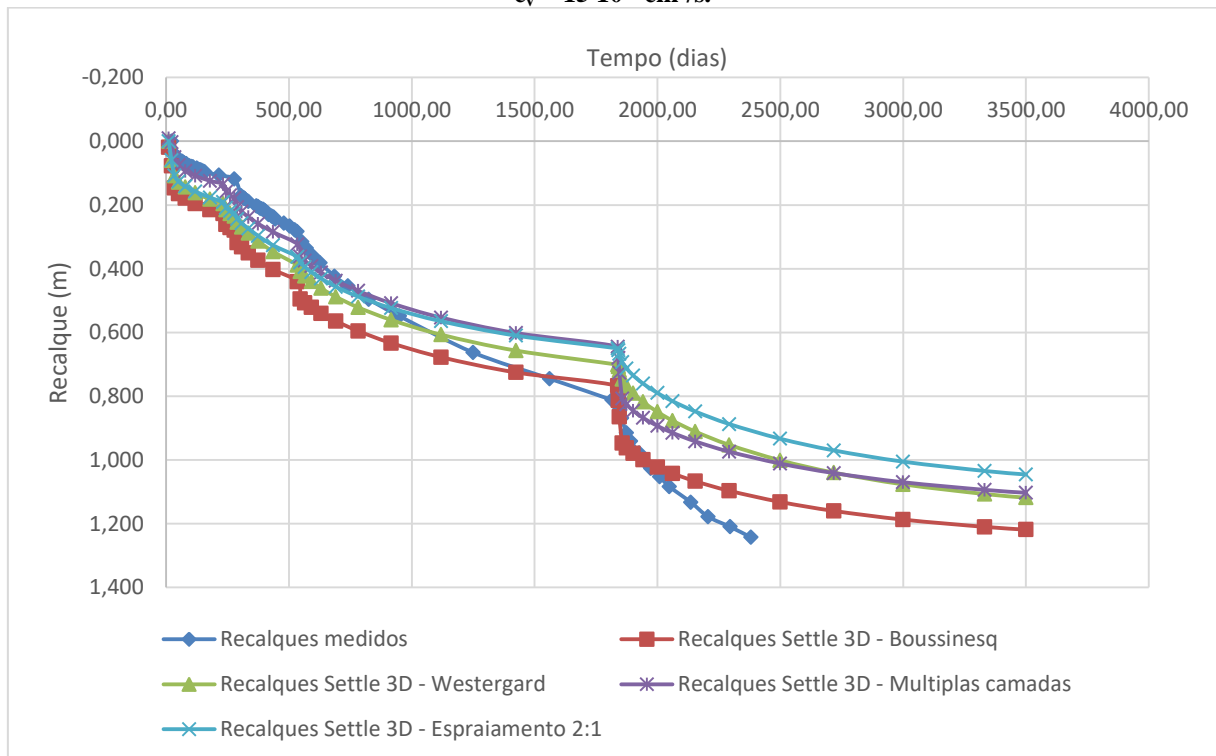
Fonte: Autor.

**Figura 80 - Curvas recalque x tempo do aterro II, seção F, calculadas por métodos computacionais para  $c_v = 4 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$ .**



Fonte: Autor.

**Figura 81 - Curvas recalque x tempo do aterro II, seção G, calculadas por métodos computacionais para  $c_v = 15 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$ .**



Fonte: Autor.

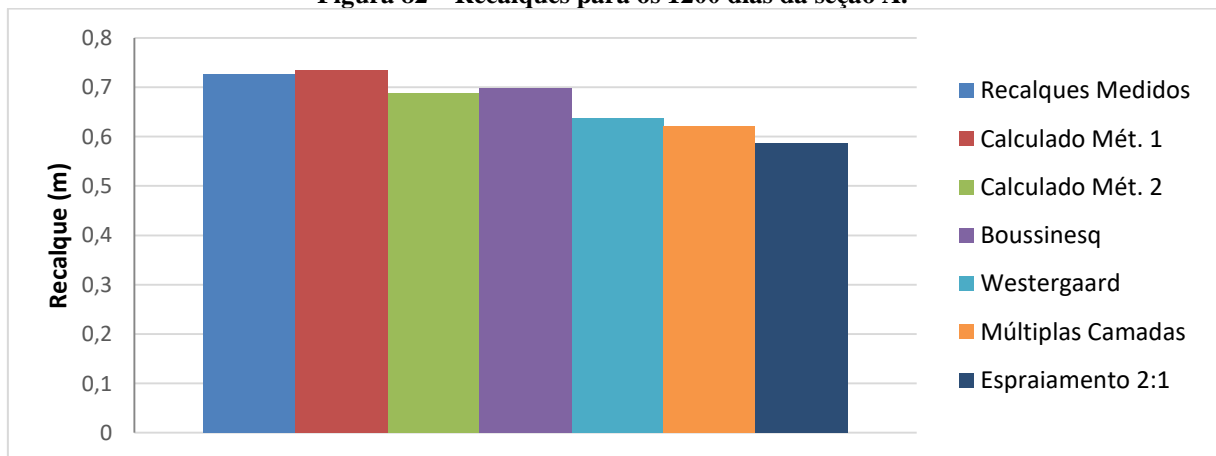
Quando se trata das seções com drenos é observado o mesmo comportamento encontrado nos resultados analíticos: as curvas calculadas se afastam no centro, apresentando tendência de estabilização dos recalques. Entretanto, os recalques da instrumentação continuam crescendo.

Em ambas as análises de recalque, analítica e computacional, foi possível notar a diferença que ocorre entre os dias 1000 e 2000 entre as estimativas de recalque e o recalque medido. Isso é decorrente provavelmente do fato de os cálculos realizados neste trabalho não considerarem o recalque por adensamento secundário, que costuma ser notado justamente ao fim do desenvolvimento dos recalques por adensamento primário, e por isso essa diferença fica mais evidente nas seções que apresentam drenos verticais.

### 5.2.3 Comparação entre métodos de cálculo bidimensional e tridimensional:

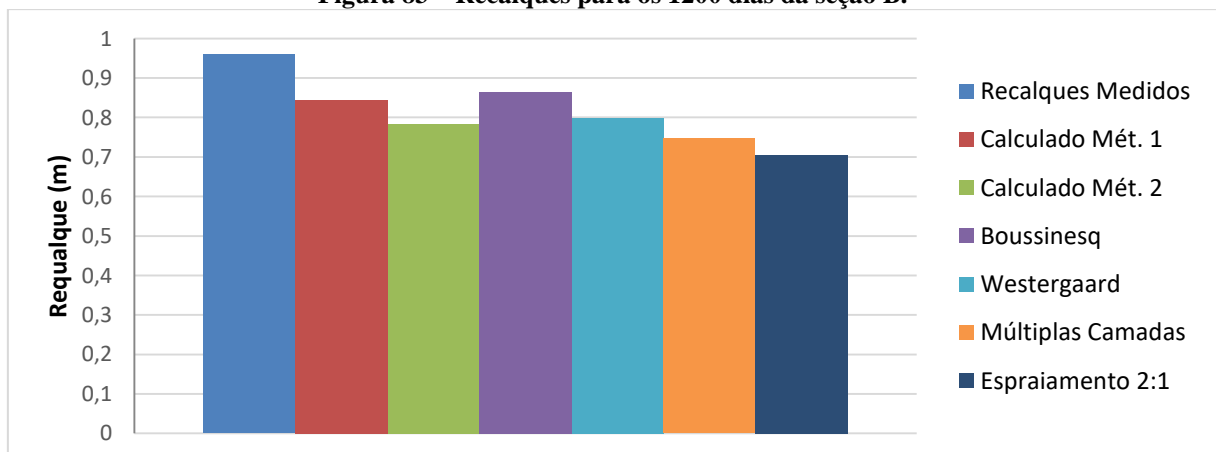
Nesta seção é realizada a comparação entre os métodos de cálculo considerando os recalques até aproximadamente 1200 dias para as seções do aterro II. As Figuras 80 a 86 mostram os recalques obtidos para as seções do aterro II pelos diferentes métodos.

**Figura 82 – Recalques para os 1200 dias da seção A.**



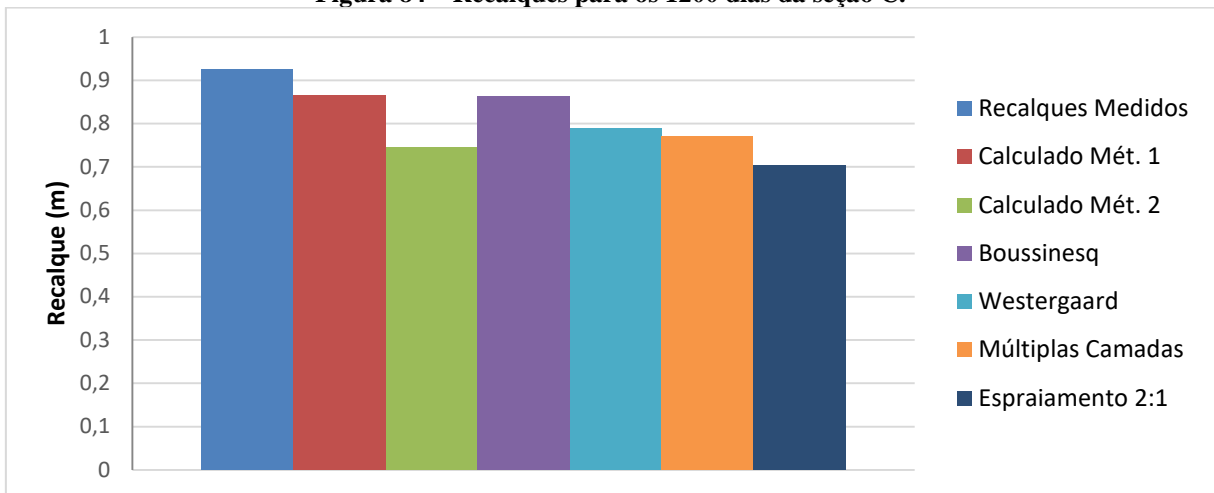
Fonte: Autor.

**Figura 83 – Recalques para os 1200 dias da seção B.**



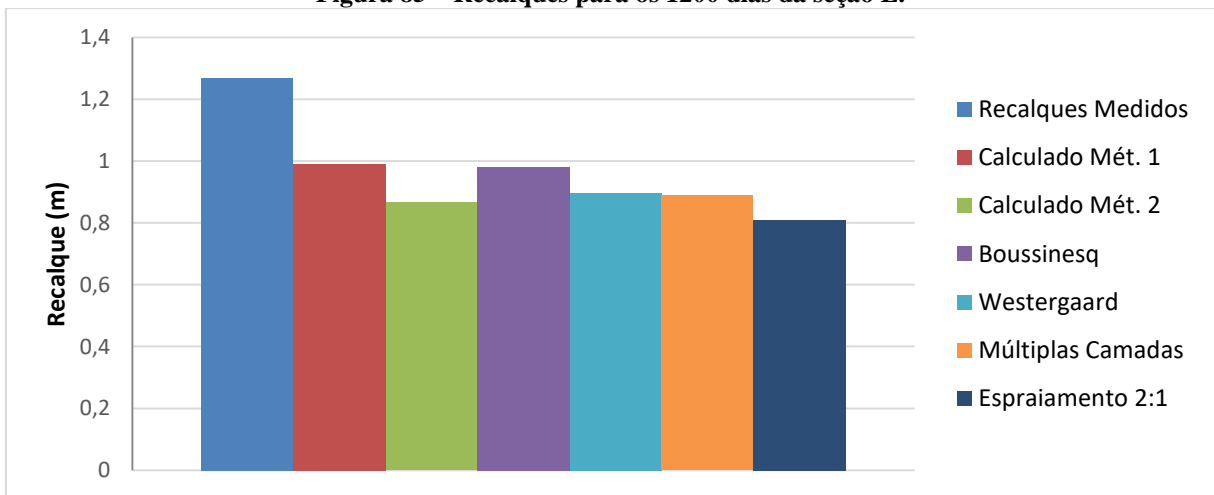
Fonte: Autor.

**Figura 84 – Recalques para os 1200 dias da seção C.**



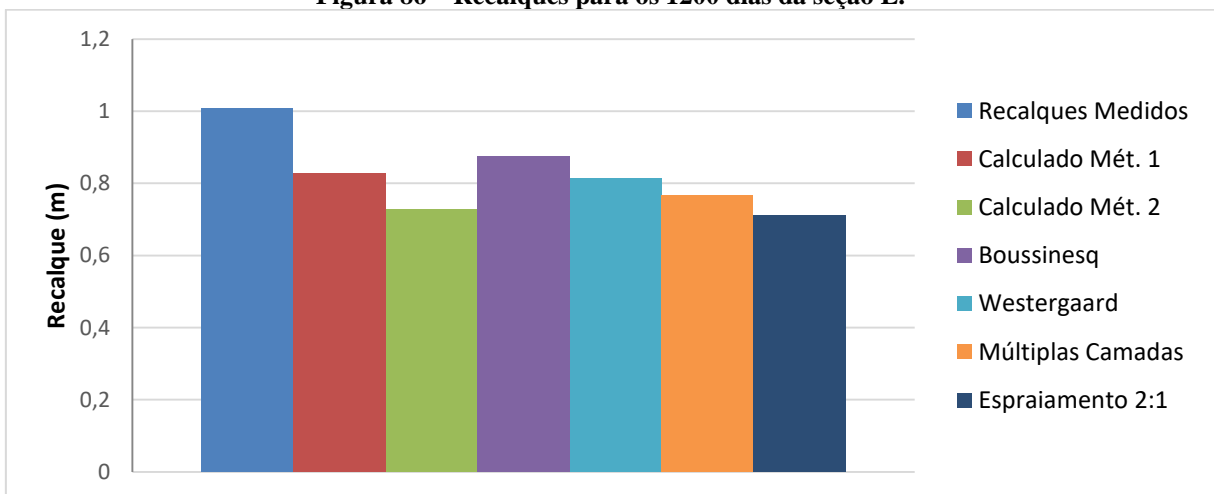
Fonte: Autor.

**Figura 85 – Recalques para os 1200 dias da seção E.**



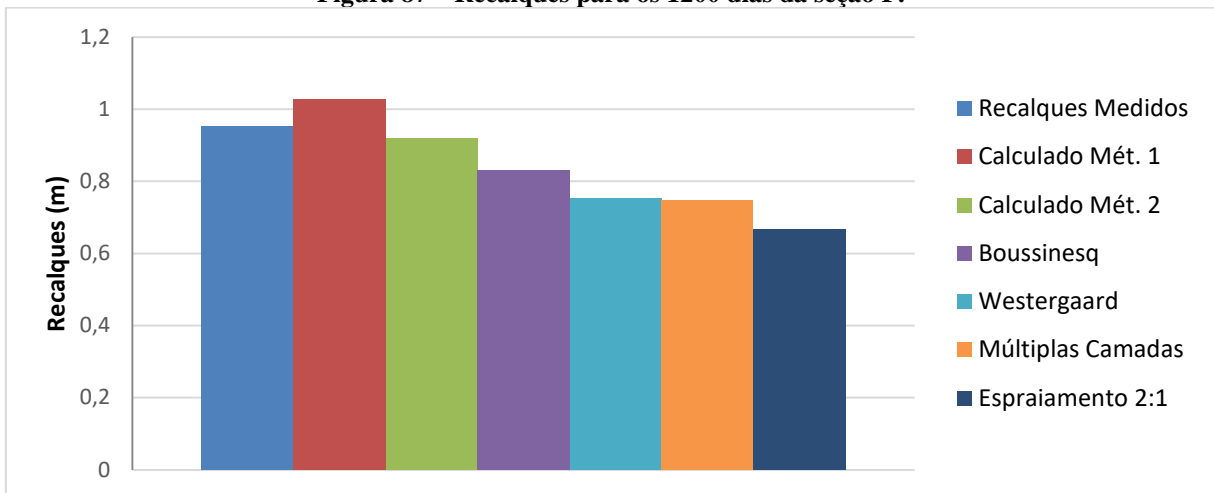
Fonte: Autor.

**Figura 86 – Recalques para os 1200 dias da seção E.**



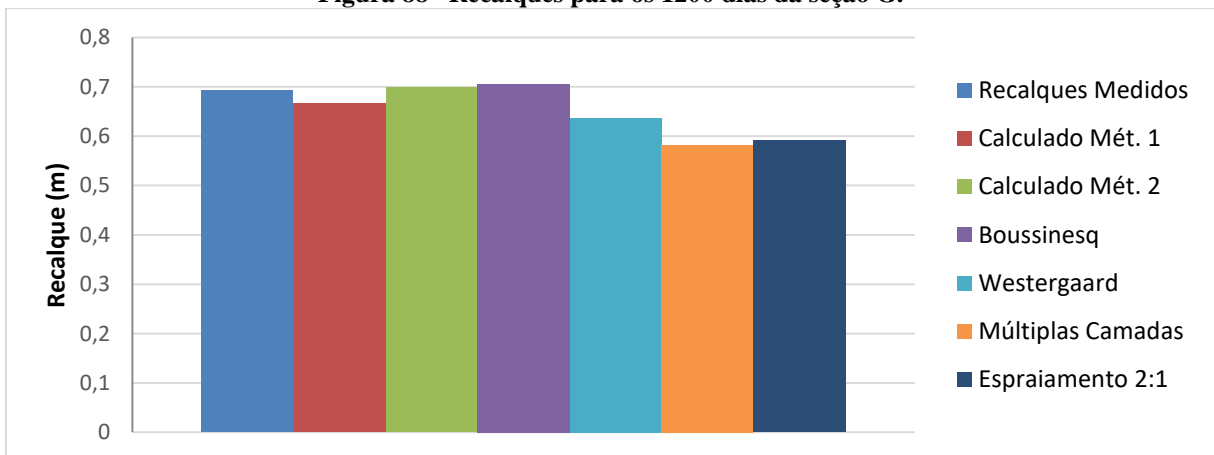
Fonte: Autor.

**Figura 87 – Recalques para os 1200 dias da seção F.**



Fonte: Autor.

**Figura 88– Recalques para os 1200 dias da seção G.**



Fonte: Autor.

Foi escolhida essa faixa de tempo (aproximadamente 1200 dias) pelo fato de os recalques por adensamento secundários ainda não terem tomado grandes proporções.

De forma similar aos resultados da seção 5.1.3, o método de Boussinesq foi mais uma vez o método mais conservador, apresentando as maiores estimativas de recalque. Tanto os recalques obtidos pela consideração bidimensional quanto pela tridimensional foram relativamente aproximadas dos recalques reais.



## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os recalques calculados tanto pelos métodos analíticos como pelo método computacional resultaram próximos dos recalques reais no início das curvas. Para o aterro I foi possível notar a ruptura do aterro pela curva de recalque no tempo, distanciando as curvas calculadas a partir deste momento. Considerando o aterro II foi possível notar um afastamento a partir, em média, do dia 1000, que se estendia até os 2000 dias, quando eram adicionados novos carregamentos.

A influência da falta das demais análises de recalques, particularmente de recalques por adensamento secundário, influenciou nos resultados, afastando as curvas calculadas das curvas obtidas com instrumentação em certos pontos do processo de adensamento do aterro II. Além disso, é perceptível a necessidade de uma boa avaliação dos parâmetros do solo antes da estimativa dos recalques, pois a grande variação de coeficiente de adensamento vertical influenciou diretamente na qualidade dos resultados.

Comparando-se os resultados das curvas de recalque no tempo é possível perceber a rapidez com que os recalques se desenvolvem nas seções com drenos, chegando à estabilização dos recalques muito antes das seções que não possuem drenos.

Do mesmo modo, fica visível a necessidade da estimativa da capacidade de carga e da probabilidade de ruptura do aterro ou da utilização de um método de aceleração dos recalques que não utilize de carregamento no solo para evitar a ruptura dos aterros. Isso pode ser feito por meio do uso de drenos verticais a vácuo, construção por etapas, ou outros métodos de construção do aterro abordados neste trabalho.

Por fim, não foi possível com este trabalho determinar o método que mais se aproximou dos resultados devido à incerteza da magnitude da influência dos recalques secundários. Entretanto, avaliando a praticidade dos métodos, é perceptível a rapidez com que se obtêm resultados a partir do SETTLE 3D<sup>®</sup>, sendo a modelagem muito rápida como também a computação dos dados. Possui, além disso, uma interface muito intuitiva e fácil de trabalhar. Os métodos analíticos se mostraram bons para cálculos simples e principalmente para a compreensão do problema, mas tomam muito tempo para níveis de complexidade de cálculo mais altos.

## 7 REFERÊNCIAS

ALMEIDA, Marcio de Souza S.; MARQUES, Maria Esther Soares. **Aterro sobre solos moles: projeto e desempenho**. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

BARATA, Fernando Emmanuel. **Propriedades mecânicas dos solos: uma introdução ao projeto de fundações**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora, 1984.

CINTRA, José Carlos; AOKI, Nelson; ALBIERO, José Henrique. **Fundações diretas: projeto geotécnico**. São Paulo: Oficina de Textos, 2011.

DAS, B. M. **Fundamentos da engenharia geotécnica**. São Paulo: Thomson Learning, 2007. Tradução da 6. ed. americana por All Tasks.

DOMINGOS, G. S. **O efeito tridimensional e de fluência nos recalques de fundações em argila: o método de Skempton e Njerrum revisitado**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)-Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Projeto de aterros sobre solos moles para obras viárias**. Rio de Janeiro, Publicação IPR – DNER, PRO 381/98, 1998.

FRANCHI, José Guilherme; SÍGOLO, Joel Barbujianni; MOTTA, José Francisco Marciano. **Diagnóstico das turfas no Brasil: histórico da utilização, classificação, geologia e dados econômicos**. Revista Brasileira de Geociências, São Paulo, v. 36, p. 179-190, mar. 2006. Suplemento.

FUNDAÇÕES ESPECIAIS LTDA. **Geodrenos**. 2009. Disponível em: <[http://www.fundesp.com.br/2009/geodrenos\\_metod.html](http://www.fundesp.com.br/2009/geodrenos_metod.html)>. Acesso em: 12 out. 2017.

FUTAI, Marcos Massao. **Considerações sobre a influência do adensamento secundário e do uso de reforços em aterros sobre solos moles**. 2010. Tese (Doutorado em Livre Docência) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

GOOGLE MAPS. **Localização dos aterros do IPR**. 2017. Disponível em: <<https://www.google.com.br/maps/@-22.7833117,-43.2518762,11z>>. Acesso em: 22 out. 2017.

JANNUZZI, Graziella Maria Faquim. **Caracterização do depósito de solo mole de Sarapuí II através de ensaios de campo**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013

LIMA, Bruno Teixeira. **Modelagem numérica da construção de aterro instrumentado na Baixada Fluminense, Rio de Janeiro**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro 2007.

MASSAD, Façal. **Obras de terra: curso básico de geotecnia**. 2 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

OLIVEIRA, Rodrigo Fábio Silva de; ALBUQUERQUE, Fernando Silva; CAVALCANTE Erinaldo Hilário; FREITAS NETO, Osvaldo de. **Análise da estabilidade de aterro sobre solo mole em obra rodoviária**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 17, 2014, Goiânia, Anais... São Paulo: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos, 2014.

ORTIGÃO, José Alberto Ramalho. **Aterro experimental levado à ruptura sobre argila cinza do Rio de Janeiro**. 1980. Tese (Doutorado em Engenharia Civil)-Faculdade de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1980.

PINTO, Carlos de Souza. **Curso Básico básico de Mecânica mecânica dos solos em 16 aulas**. 3 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

POULOS, H. G.; DAVIS, E.H. (1974), **Elastic solutions for soil and rock mechanics**. New York: John Wiley and Sons, 1974.

ROCSCIENCE. **Settle3D**: theory manual. Toronto, 2009.

SANTOS, G. V. **Patologias devido ao recalque diferencial em fundações**. 2014. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil ) - 2014. Faculdade de Tecnologia e Ciências Sociais Aplicadas, Centro Universitário de Brasília, Brasília, 2014.

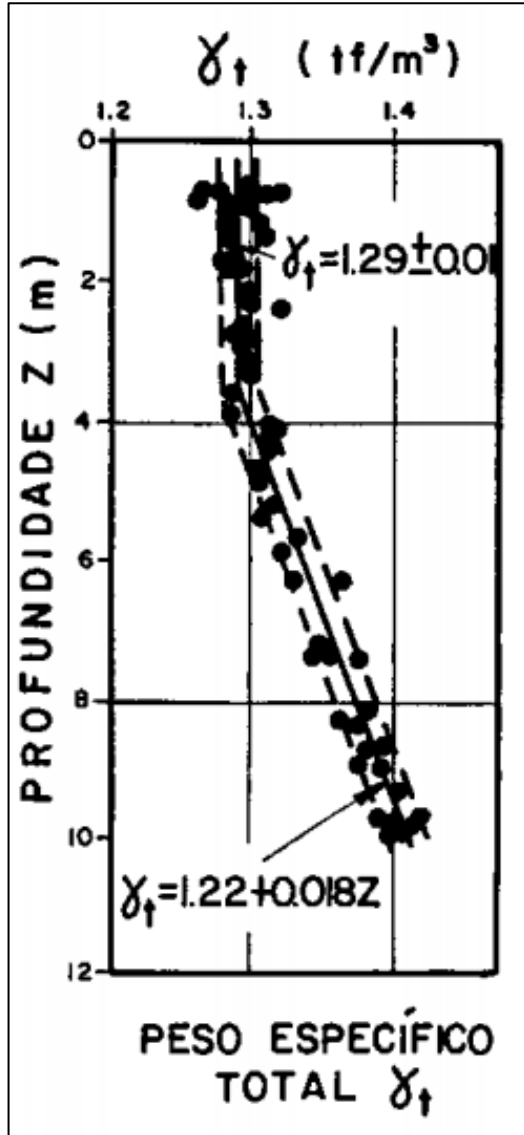
SILVA, Diego Moreira da. **Estimativa do índice de compressão de argilas moles da costa brasileira a partir de ensaios de caracterização**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

TERRA, B. R. C. dos S. e S. R. **Análise de recalques do aterro experimental II sobre a argila mole de Sarapuí com elementos drenantes**. 1988. Tese (Mestrado em Engenharia Civil)-Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1988.

TERZAGHI, Karl Von. **Theoretical soil mechanics**. New York: John Wiley & Sons, 1943.

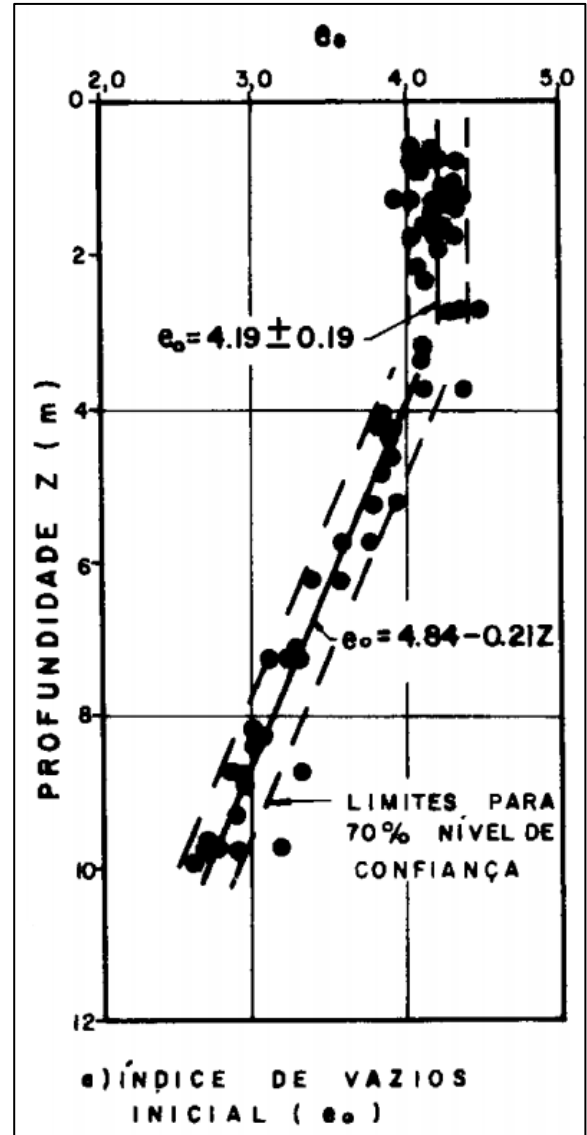
## APÊNDICE A: Curvas do trabalho de Ortigão.

Figura A1 – Peso específico x profundidade obtido por Ortigão a partir de resultados de ensaios



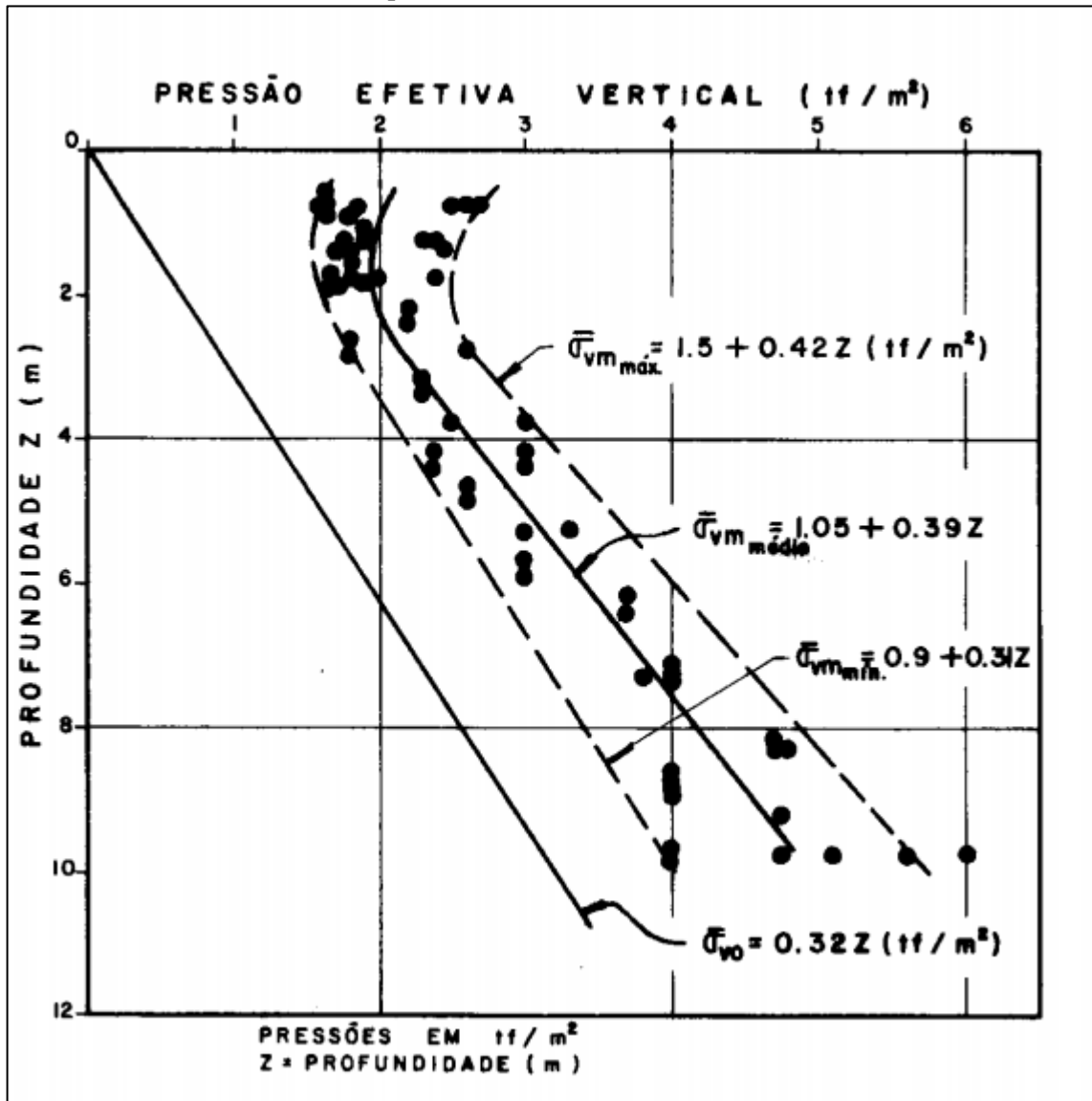
Fonte: Ortigão, 1980, p. 53.

Figura A2 – Índice de vazios inicial x profundidade obtido por Ortigão a partir de resultados de ensaios



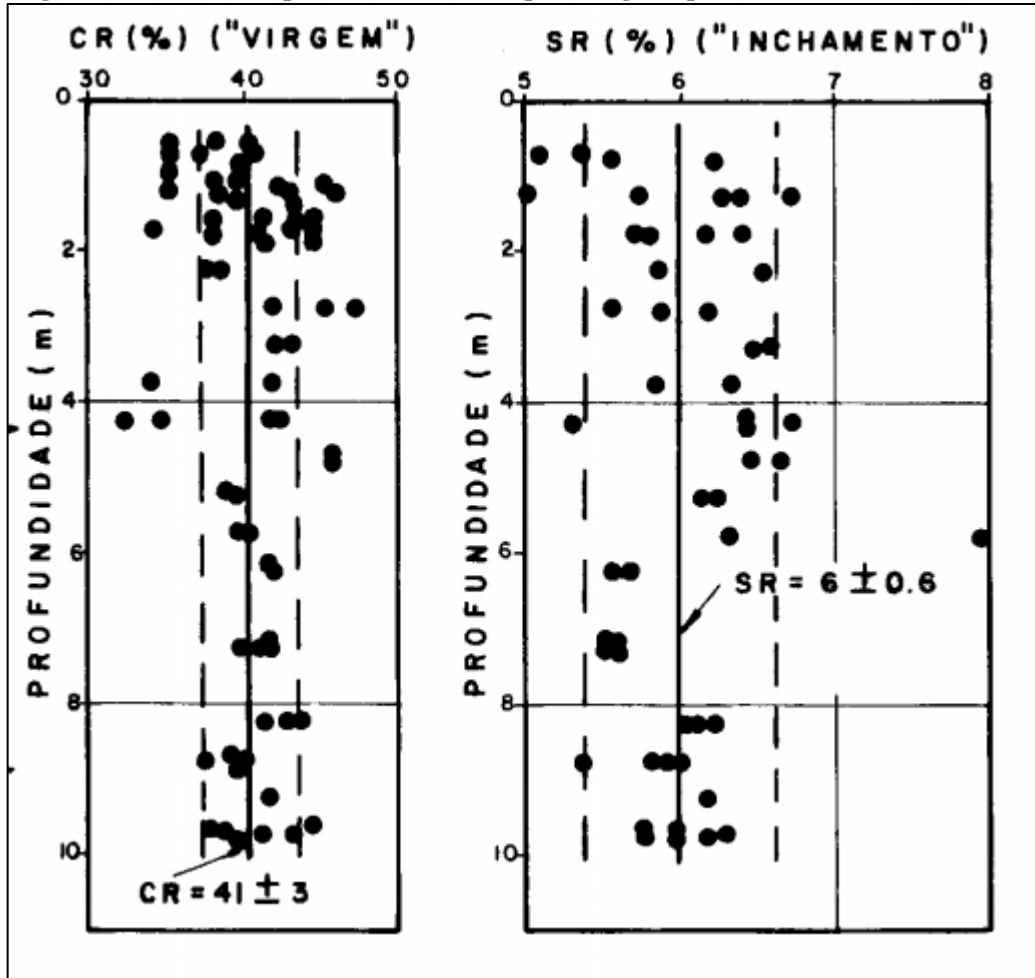
Fonte: Ortigão, 1980, p. 53.

Figura A3 – Tensão de sobreadensamento e tensão inicial no solo x profundidade obtido por Ortigão a partir de resultados de ensaios



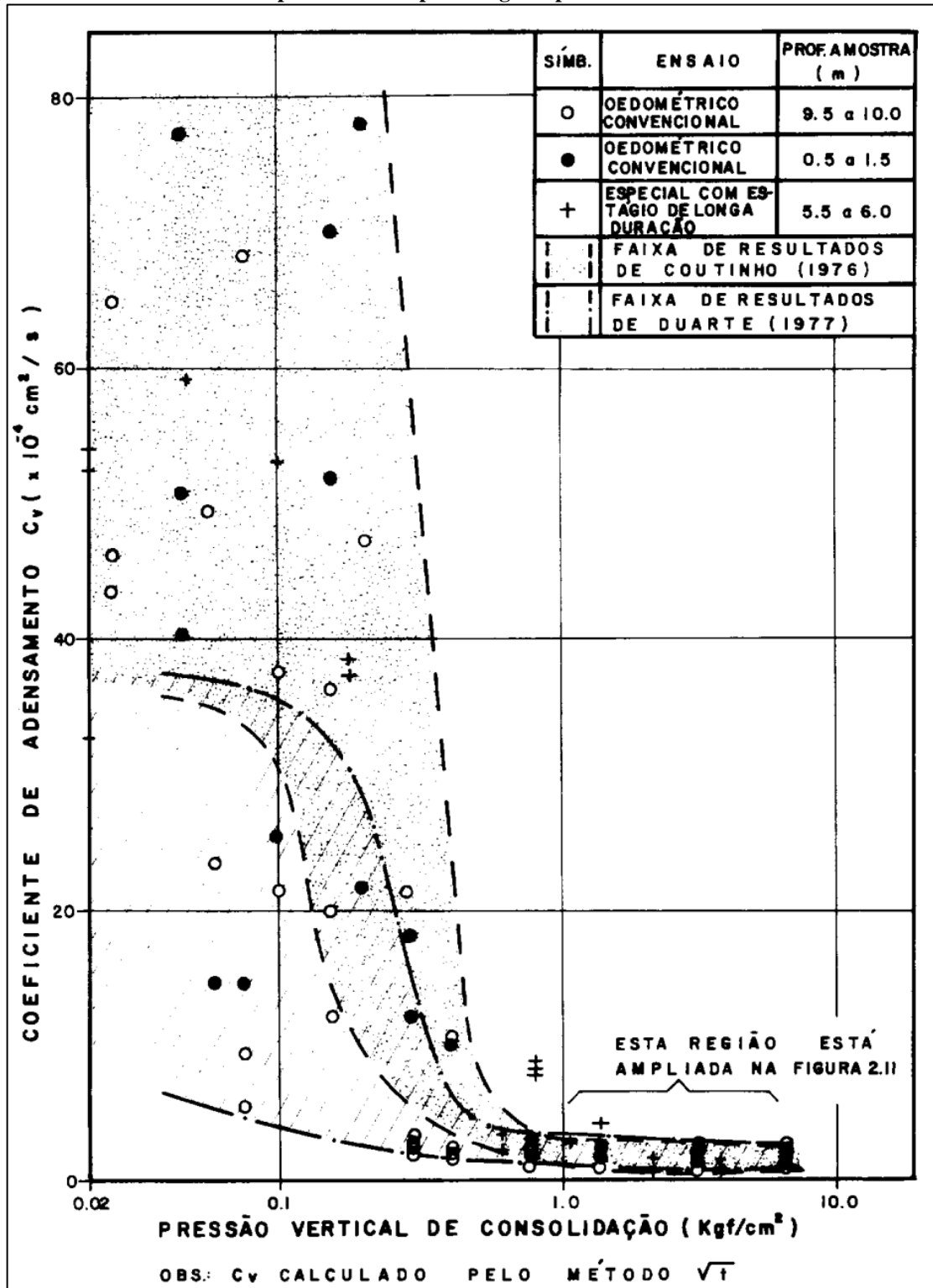
Fonte: Ortigão, 1980, p. 55.

Figura A4 – CR e SR x profundidade obtido por Ortigão a partir de resultados de ensaios



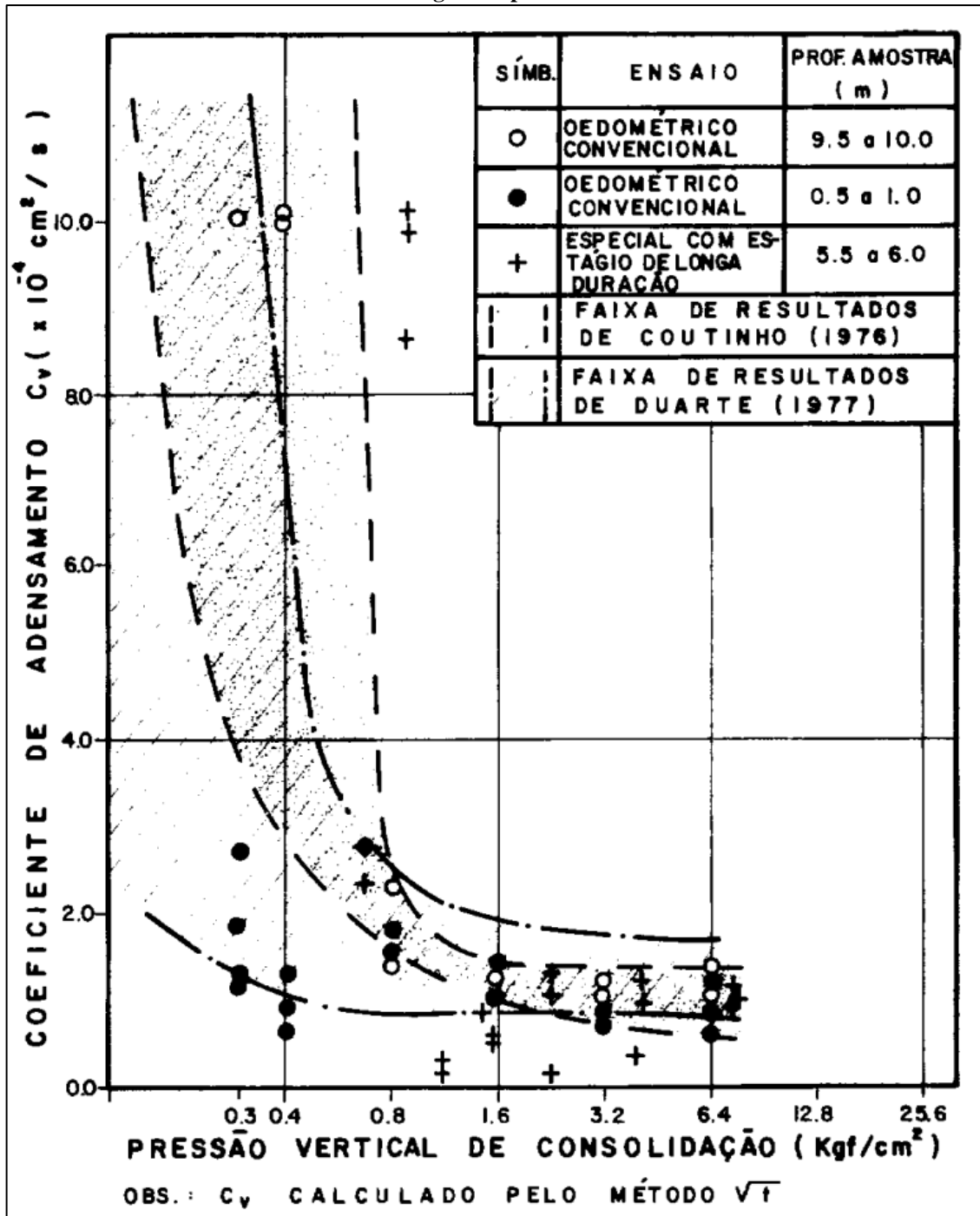
Fonte: Ortigão, 1980, p. 57.

Figura A5 – Curva  $c_v$  x tensão aplicada obtida por Ortigão a partir de resultados de ensaios edométricos.



Fonte: Ortigão, 1980, p. 59.

Figura A6 – Curva  $c_v$  x tensão aplicada obtida por Ortigão a partir de resultados de ensaios edométrico – região ampliada.



Fonte: Ortigão, 1980, p. 60.



## APÊNDICE B: Parâmetros das seções do Aterro Experimental II.

**Tabela B1 - Dados do solo para as seções A, B, C e D**

Dados do solo do Sarapuí - Aterro Experimental II - Seções A, B, C e D											
C.	Prof. I.(m)	Prof. F.(m)	$\Delta h$ (m)	$z_{méd}$ (m)	$\gamma_{sat}$ ( $kN/m^3$ )	$\sigma'_a$ ( $kN/m^2$ )	$\sigma'_{v0}$ ( $kN/m^2$ )	$C_s$	$C_c$	$e_0$	OCR
1	0,0	1,0	1,0	0,5	12,74	12,20	1,37	0,22	1,49	4,38	8,91
2	1,0	2,0	1,0	1,5	12,74	16,02	4,11	0,22	1,49	4,38	3,90
3	2,0	3,0	1,0	2,5	12,74	19,85	6,85	0,22	1,49	4,38	2,90
4	3,0	4,0	1,0	3,5	12,74	23,67	9,59	0,22	1,49	4,38	2,47
5	4,0	5,0	1,0	4,5	12,75	27,49	12,37	0,19	1,27	3,90	2,22
6	5,0	6,0	1,0	5,5	12,93	31,31	16,09	0,18	1,18	3,69	1,95
7	6,0	7,0	1,0	6,5	13,10	35,13	20,17	0,16	1,09	3,48	1,74
8	7,0	8,0	1,0	7,5	13,28	38,96	24,59	0,15	1,00	3,27	1,58
9	8,0	9,0	1,0	8,5	13,46	42,78	29,37	0,14	0,90	3,06	1,46
10	9,0	10,0	1,0	9,5	13,63	46,60	34,50	0,12	0,81	2,85	1,35
11	10,0	11,0	1,0	10,5	13,81	50,42	39,99	0,11	0,72	2,64	1,26

$\Delta h$  = espessura da camada de argila

$z_{méd}$  = profundidade média da camada

$\gamma_{sat}$  = peso específico saturado da argila

$\sigma'_a$  = tensão efetiva de pré adensamento

$\sigma'_{v0}$  = tensão efetiva vertical inicial

$C_r$  = índice de recompressão

$C_c$  = índice de compressão

$e_0$  = índice de vazios inicial

OCR = razão de sobreadensamento

Fonte: Autor.

**Tabela B2 - Dados do solo para a seção E.**

Dados do solo do Sarapuí - Aterro Experimental II - Seção E											
C.	Prof. I.(m)	Prof. F.(m)	$\Delta h$ (m)	$z_{méd}$ (m)	$\gamma_{sat}$ ( $kN/m^3$ )	$\sigma'_a$ ( $kN/m^2$ )	$\sigma'_{v0}$ ( $kN/m^2$ )	$C_s$	$C_c$	$e_0$	OCR
1	0,0	1,0	1,0	0,5	12,74	12,20	1,37	0,22	1,49	4,38	8,91
2	1,0	2,0	1,0	1,5	12,74	16,02	4,11	0,22	1,49	4,38	3,90
3	2,0	3,0	1,0	2,5	12,74	19,85	6,85	0,22	1,49	4,38	2,90
4	3,0	4,0	1,0	3,5	12,74	23,67	9,59	0,22	1,49	4,38	2,47
5	4,0	5,0	1,0	4,5	12,75	27,49	12,37	0,19	1,27	3,90	2,22
6	5,0	6,0	1,0	5,5	12,93	31,31	16,09	0,18	1,18	3,69	1,95
7	6,0	7,0	1,0	6,5	13,10	35,13	20,17	0,16	1,09	3,48	1,74
8	7,0	8,0	1,0	7,5	13,28	38,96	24,59	0,15	1,00	3,27	1,58
9	8,0	9,0	1,0	8,5	13,46	42,78	29,37	0,14	0,90	3,06	1,46
10	9,0	10,0	1,0	9,5	13,63	46,60	34,50	0,12	0,81	2,85	1,35
11	10,0	10,2	0,2	10,1	13,74	48,89	37,75	0,15	0,70	2,72	1,30

$\Delta h$  = espessura da camada de argila

$z_{méd}$  = profundidade média da camada

$\gamma_{sat}$  = peso específico saturado da argila

$\sigma'_a$  = tensão efetiva de pré adensamento

$\sigma'_{v0}$  = tensão efetiva vertical inicial

$C_r$  = índice de recompressão

$C_c$  = índice de compressão

$e_0$  = índice de vazios inicial

OCR = razão de sobreadensamento

Fonte: Autor.

**Tabela B3 - Dados do solo para a seção F.**

Dados do solo do Sarapuú - Aterro Experimental II - Seção F											
C.	Prof. I.(m)	Prof. F.(m)	$\Delta h$ (m)	$z_{méd}$ (m)	$\gamma_{sat}$ ( $kN/m^3$ )	$\sigma'_a$ ( $kN/m^2$ )	$\sigma'_{V0}$ ( $kN/m^2$ )	$C_s$	$C_c$	$e_0$	OCR
1	0,0	1,0	1,0	0,5	12,74	12,20	1,37	0,22	1,49	4,38	8,91
2	1,0	2,0	1,0	1,5	12,74	16,02	4,11	0,22	1,49	4,38	3,90
3	2,0	3,0	1,0	2,5	12,74	19,85	6,85	0,22	1,49	4,38	2,90
4	3,0	4,0	1,0	3,5	12,74	23,67	9,59	0,22	1,49	4,38	2,47
5	4,0	5,0	1,0	4,5	12,75	27,49	12,37	0,19	1,27	3,90	2,22
6	5,0	6,0	1,0	5,5	12,93	31,31	16,09	0,18	1,18	3,69	1,95
7	6,0	7,0	1,0	6,5	13,10	35,13	20,17	0,16	1,09	3,48	1,74
8	7,0	8,0	1,0	7,5	13,28	38,96	24,59	0,15	1,00	3,27	1,58
9	8,00	9,00	1,0	8,50	13,46	42,78	29,37	0,18	0,84	3,06	1,46

$\Delta h$  = espessura da camada de argila  
 $z_{méd}$  = profundidade média da camada  
 $\gamma_{sat}$  = peso específico saturado da argila  
 $\sigma'_a$  = tensão efetiva de pré adensamento  
 $\sigma'_{V0}$  = tensão efetiva vertical inicial  
 $Cr$  = índice de recompressão  
 $Cc$  = índice de compressão  
 $e_0$  = índice de vazios inicial  
OCR = razão de sobreadensamento

Fonte: Autor.

**Tabela B4 - Dados do solo para a seção G.**

Dados do solo do Sarapuú - Aterro Experimental II - Seção G											
C.	Prof. I.(m)	Prof. F.(m)	$\Delta h$ (m)	$z_{méd}$ (m)	$\gamma_{sat}$ ( $kN/m^3$ )	$\sigma'_a$ ( $kN/m^2$ )	$\sigma'_{V0}$ ( $kN/m^2$ )	$C_s$	$C_c$	$e_0$	OCR
1	0,0	1,0	1,0	0,5	12,74	12,20	1,37	0,22	1,49	4,38	8,91
2	1,0	2,0	1,0	1,5	12,74	16,02	4,11	0,22	1,49	4,38	3,90
3	2,0	3,0	1,0	2,5	12,74	19,85	6,85	0,22	1,49	4,38	2,90
4	3,0	4,0	1,0	3,5	12,74	23,67	9,59	0,22	1,49	4,38	2,47
5	4,0	5,0	1,0	4,5	12,75	27,49	12,37	0,19	1,27	3,90	2,22
6	5,0	6,0	1,0	5,5	12,93	31,31	16,09	0,18	1,18	3,69	1,95
7	6,0	7,0	1,0	6,5	13,10	35,13	20,17	0,16	1,09	3,48	1,74
8	7,0	8,0	1,0	7,5	13,28	38,96	24,59	0,15	1,00	3,27	1,58
9	8,0	9,0	1,0	8,5	13,46	42,78	29,37	0,14	0,90	3,06	1,46
10	9,00	10,0	1,0	9,50	13,63	46,60	34,50	0,17	0,76	2,85	1,35

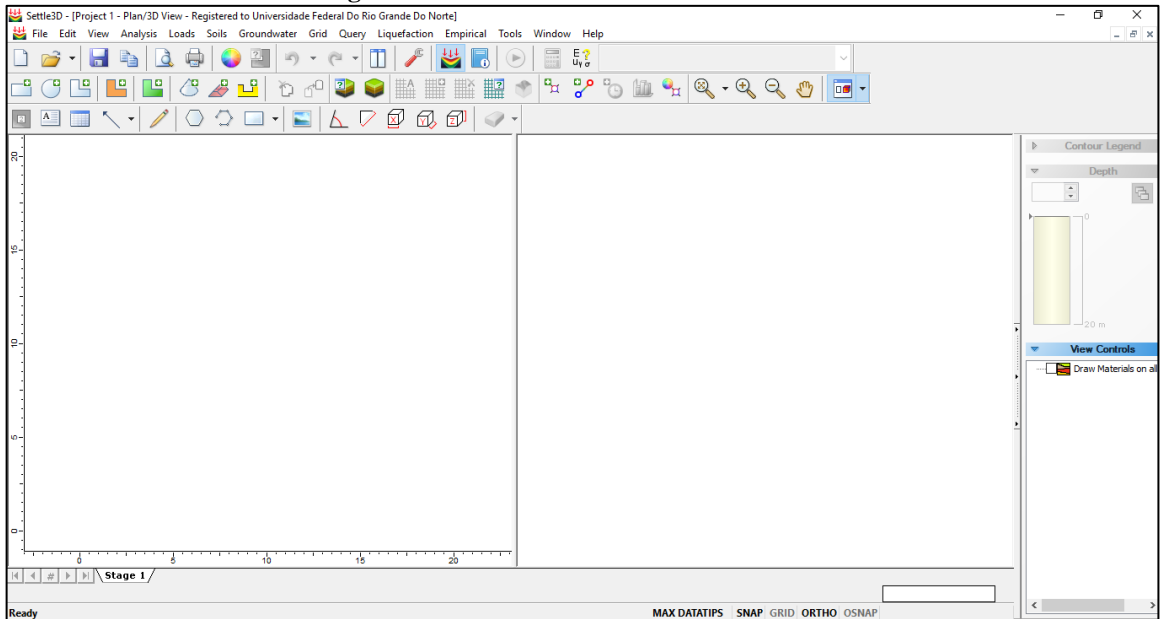
$\Delta h$  = espessura da camada de argila  
 $z_{méd}$  = profundidade média da camada  
 $\gamma_{sat}$  = peso específico saturado da argila  
 $\sigma'_a$  = tensão efetiva de pré adensamento  
 $\sigma'_{V0}$  = tensão efetiva vertical inicial  
 $Cr$  = índice de recompressão  
 $Cc$  = índice de compressão  
 $e_0$  = índice de vazios inicial  
OCR = razão de sobreadensamento

Fonte: Autor.


## APÊNDICE C: Aplicação da ferramenta SETTLE 3D®.

Nesta seção apresenta-se simplificada um tutorial para a simulação de um aterro construído em etapas sobre solo mole com nível d'água conhecido utilizando o programa SETTLE 3D® versão 4.0 da Rocscience. Após aberto, o programa mostrará a tela da Figura C 1:

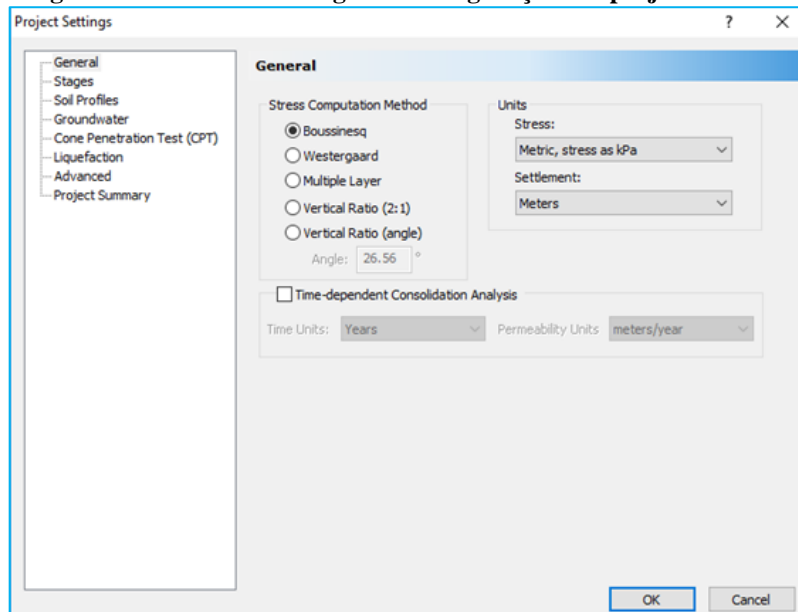
**Figura C1 - Interface inicial do SETTLE 3D®**



Fonte: Autor.

Logo depois, definem-se os estágios de construção desse aterro. Para isso deve-se clicar em Project settings  ou em *Analysis* → *Project settings*. O programa abrirá a caixa de diálogo da Figura C 2

**Figura C2 – Caixa de diálogo das configurações do projeto – Geral.**



Fonte: Autor.

O próximo passo é selecionar *Stages* e determinar os estágios da construção do aterro. Neste exemplo serão usados 5 estágios para modelar um aterro de 4 metros de altura, como indicado na Tabela C1.

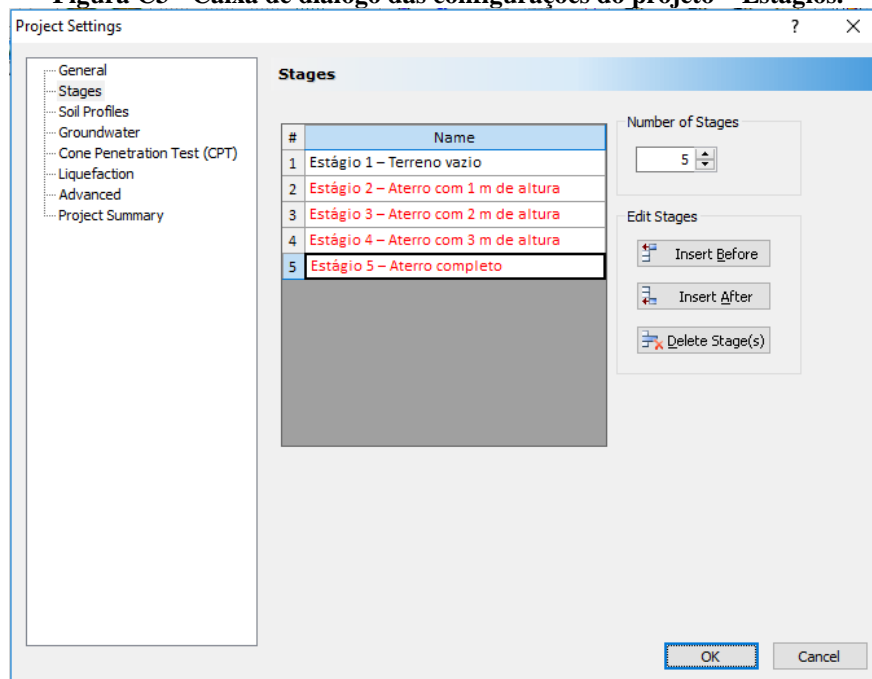
**Tabela C1 - Estágios utilizados**

Estágio 1 – Terreno vazio
Estágio 2 – Aterro com 1 m de altura
Estágio 3 – Aterro com 2 m de altura
Estágio 4 – Aterro com 3 m de altura
Estágio 5 – Aterro completo

Fonte: Autor.

Para isso determina-se o número de estágios (*Number of Stages*) como 5 e em seguida preenchem-se as linhas que aparecerão com uma descrição dos estágios. A Figura C 3 ilustra esse passo.

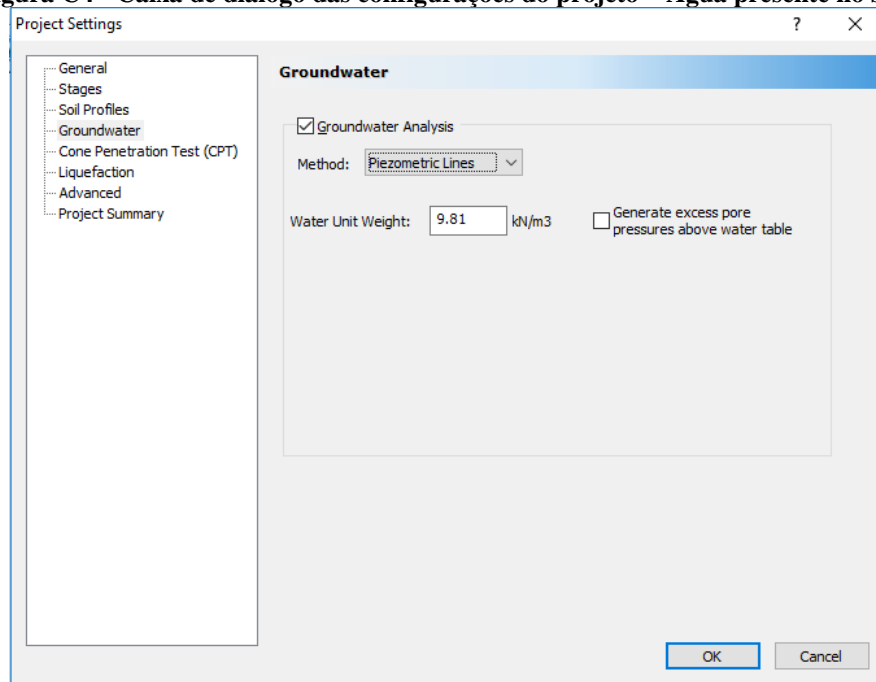
**Figura C3 - Caixa de diálogo das configurações do projeto – Estágios.**



Fonte: Autor.


Depois, prossegue-se para *Groundwater*, habilita-se *Groundwater Analysis* e seleciona-se o método de análise *Piezometric Lines*. Ao fim desta etapa, tem-se uma caixa de diálogo como a da Figura C 4.

**Figura C4 - Caixa de diálogo das configurações do projeto – Água presente no solo.**

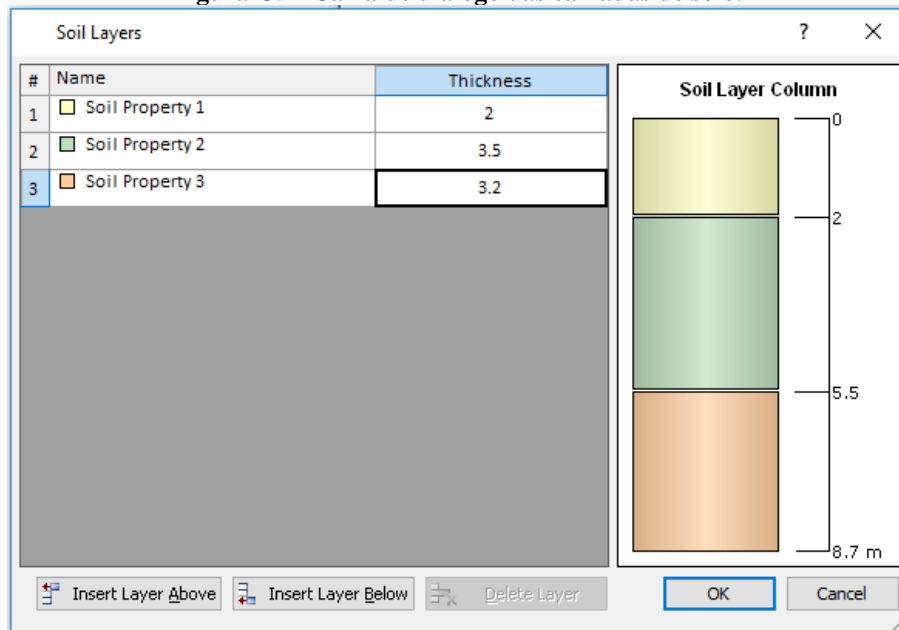


Fonte: Autor.





Clique em *OK* e no símbolo  para determinar as camadas de solo abaixo do aterro. Para isso, clique em *Insert Layer Below* até ter o numero de camadas desejadas e indique a espessura (*Thickness*) de cada camada. Neste exemplo, serão adotadas 3 camadas de solo com espessuras de 2 m, 3,5 m e 3,2 m, conforme a Figura C 5. Note que o separador decimal do programa é o ponto, e não a vírgula.

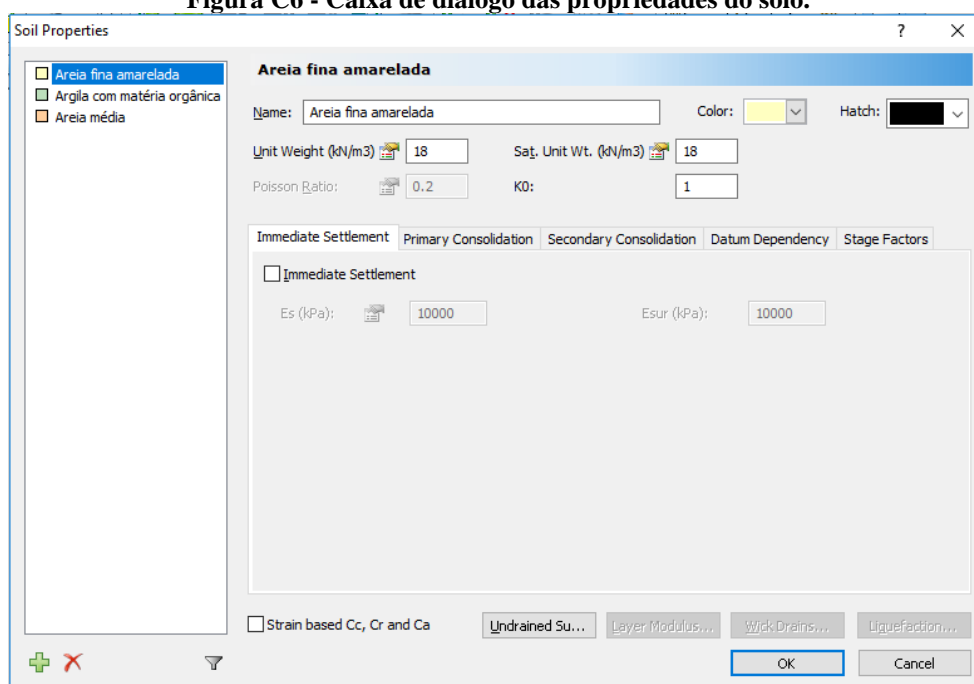
**Figura C5 - Caixa de diálogo das camadas de solo.**



Fonte: Autor.

Clique em OK e siga para o símbolo ao lado , para determinamos as propriedades de cada solo. No nosso exemplo teremos 3 solos, sendo uma areia fina amarelada, uma argila com matéria orgânica e uma areia média. Então podemos nomear os solos, determinar seus pesos específicos (*Unit Weight*) e remover as camadas restantes com o botão  situado logo abaixo. O resultado é a figura C 6:

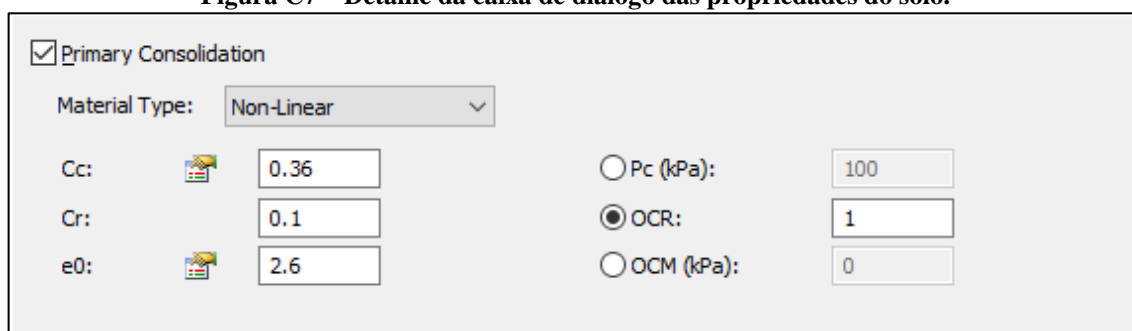
**Figura C6 - Caixa de diálogo das propriedades do solo.**



Fonte: Autor.

Agora determinam-se os tipos de recalque que o programa processará e os parâmetros relevantes de cada camada. Clique em areia fina amarelada e selecione a aba *Primary Consolidation*. Nesta aba, determinam-se os parâmetros  $C_c$ ,  $C_r$ ,  $e_0$  e OCR do solo (índice de compressibilidade, índice de recompressibilidade, índice de vazios inicial e razão de pré-adensamento, respectivamente) conforme a Figura C 7.

**Figura C7 – Detalhe da caixa de diálogo das propriedades do solo.**



Fonte: Autor.

Finalizada essa etapa, clique em *OK* e determine o formato do aterro clicando em



. Deve-se começar determinando o número de camadas, que neste exemplo é 4, e a espessura da base do aterro, que será tomada como 30 m. Logo depois é possível definir os tempos para os quais serão calculados os recalques, a presença berma de equilíbrio ou não, o ângulo de inclinação do talude, bem como a altura e o peso específico de cada camada. A caixa de diálogo ao final desta etapa é ilustrada na Figura C 8:

**Figura C8 - Caixa de diálogo de criação dos carregamentos de aterro.**

Layer	Stage	Left Bench Width (m)	Left Angle (deg)	Height (m)	Unit Weight (kN/m3)	Right Angle (deg)	Right Bench Width (m)
1	Estágio 2 – Aterro com 1 m de altura	0	45	1	18	45	0
2	Estágio 3 – Aterro com 2 m de altura	3	45	1	20	45	3
3	Estágio 4 – Aterro com 3 m de altura	0	45	1	21	45	0
4	Estágio 5 – Aterro completo	0	45	1	22	45	0

Fonte: Autor.

Clique em *OK*. Nesse momento o seu cursor se tornará um  $\oplus$ , caso você esteja na vista plana. Isso significa que você deve determinar onde irá começar e terminar o aterro. Você pode clicar na tela ou escrever coordenadas no espaço destinado para isso, conforme a Figura C 9.

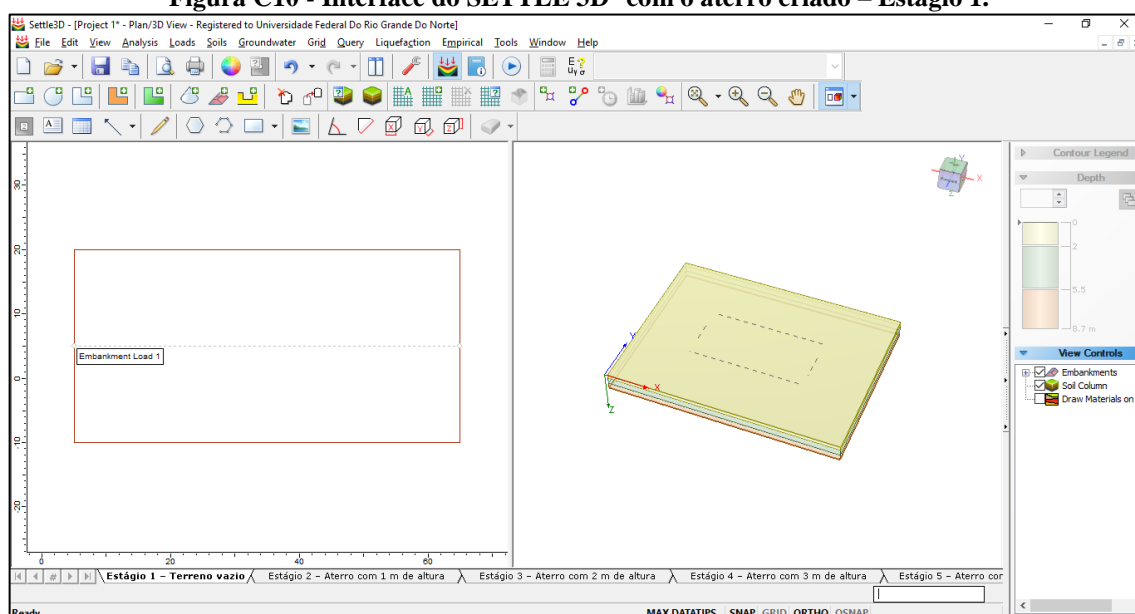
**Figura C9 – Seção que recebe o posicionamento dos pontos.**

**Pick the near point of the embankment center line [esc=cancel]**

Fonte: Autor.

Neste exemplo, o início do aterro foi definido em 5;5 e o fim em 65;5, conforme a Figura C 10.

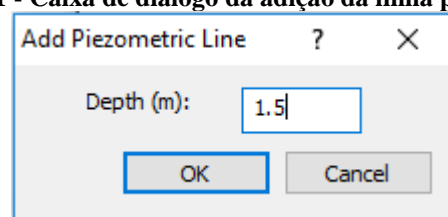
**Figura C10 - Interface do SETTLE 3D® com o aterro criado – Estágio 1.**



Fonte: Autor.

Pode-se perceber que o programa gerou um perfil de solo que ainda não apresenta nenhum aterro. Isso acontece por que estamos no Estágio 1; para ver os demais estagios basta clicar nas abas abaixo e ver a evolução do aterro em etapas. Depois disso determina-se o nível d'água no solo, clicando em *Groundwater* → *Add Piezometric Line*. Determine a profundidade do nível d'água e clique em *OK*, conforme a Figura C 11. Surgirá uma caixa de diálogo onde deve-se determinar quais camadas solos sofrerão influência da água. Selecione todos e clique em *OK*.

**Figura C11 - Caixa de diálogo da adição da linha piezométrica**



Fonte: Autor.


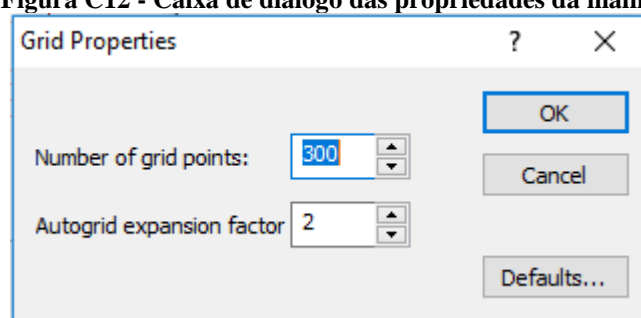
Para que se possa visualizar o comportamento do aterro, será adicionado um grid clicando em , que abrirá a caixa de diálogo da Figura C 12.



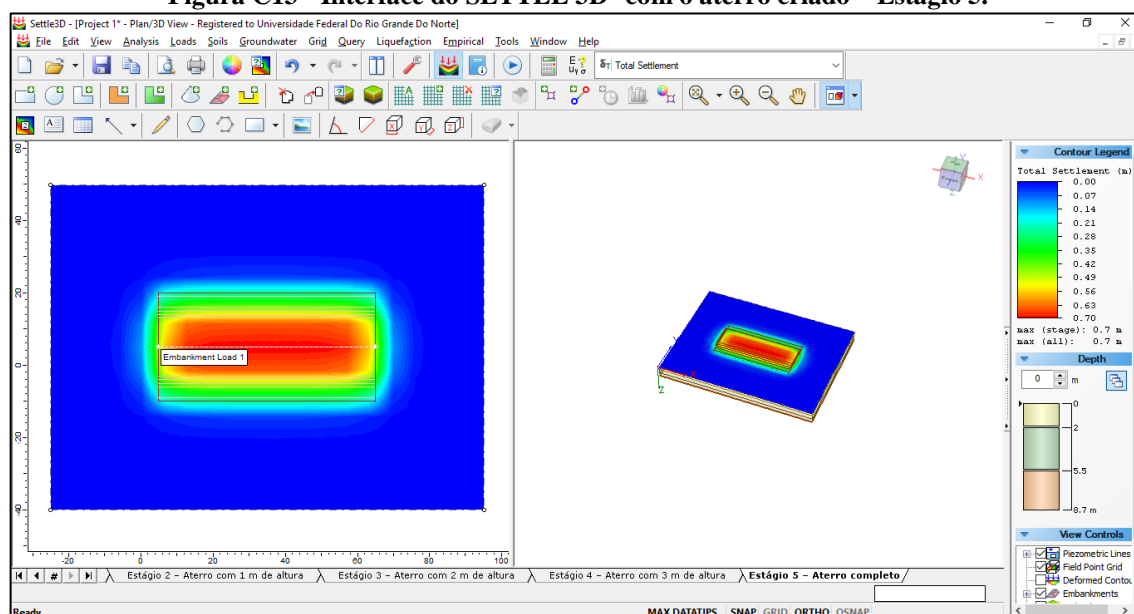
Figura C12 - Caixa de diálogo das propriedades da malha.




Fonte: Autor.

Clique em *OK*. Depois de processar os dados, a exibição do programa deve ser igual à Figura C 13:

Figura C13 - Interface do SETTLE 3D<sup>®</sup> com o aterro criado – Estágio 5.

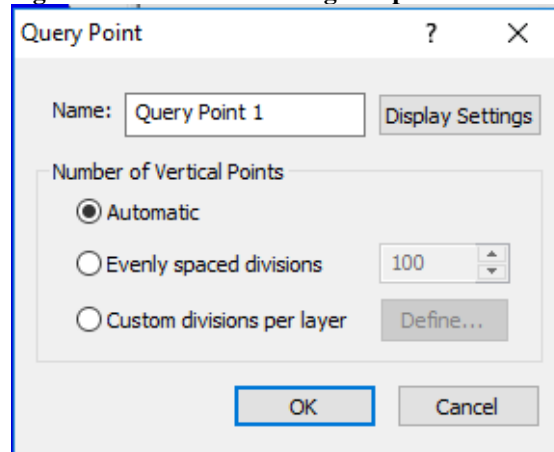


Fonte: Autor.

Agora adicione um ponto de dados (*query point*), clicando em . A caixa de diálogos será a da Figura C 14:

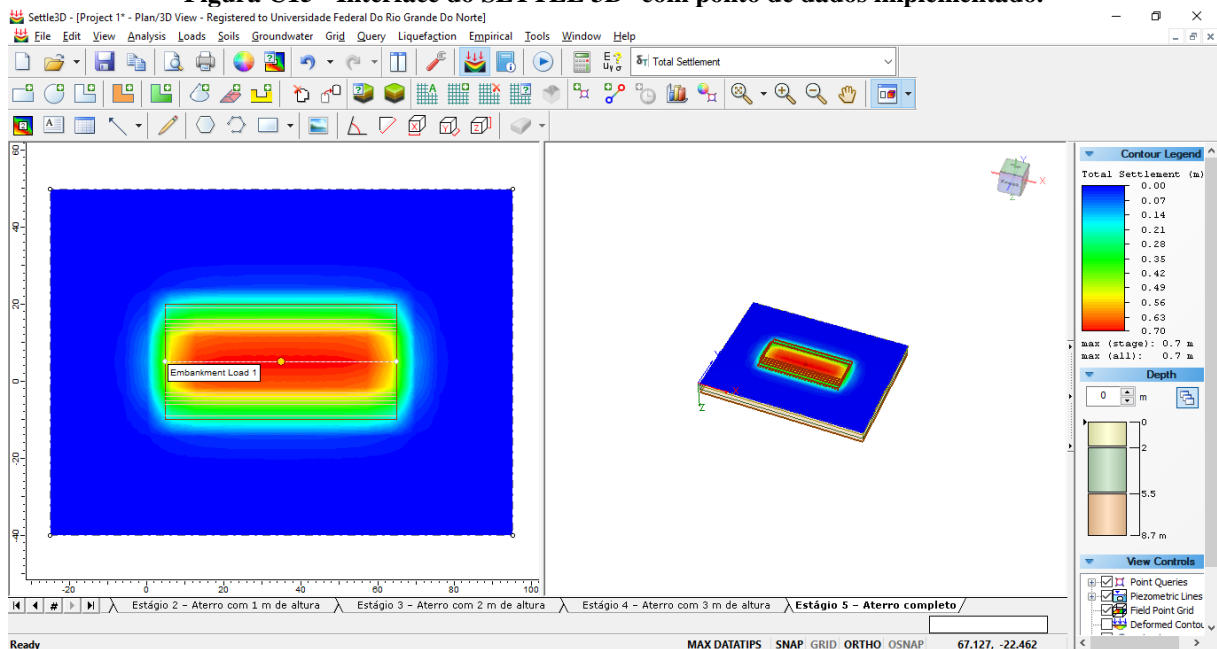
Selecione *Automatic* e clique em *OK*. Agora determina-se onde esses dados serão calculados. No nosso caso escolhe-se o ponto mais central do aterro (35;5), pois este sofre menos influência das bordas. Adicionado o ponto de dados, a interface do programa será similar à Figura C 15.

**Figura C14 - Caixa de diálogo do ponto de dados.**



Fonte: Autor.

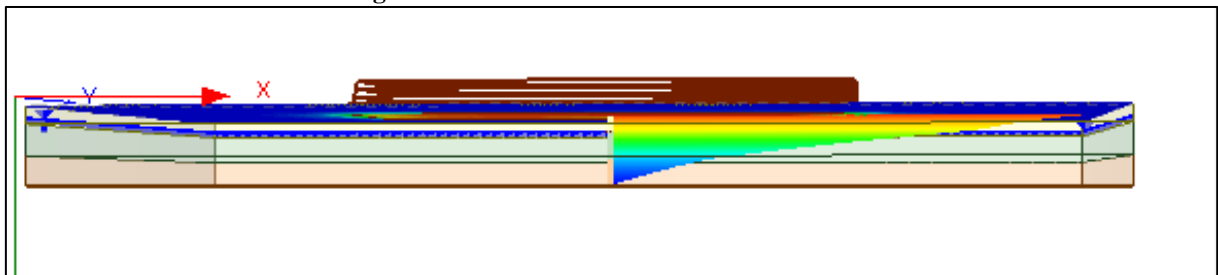
**Figura C15 - Interface do SETTLE 3D® com ponto de dados implementado.**



Fonte: Autor.

Se a vista tridimensional do programa for acessada, é possível aproximar-se e rotacionar o aterro para melhor observar o recalque no ponto central, como ilustrado na Figura C 16.

**Figura C16 – Detalhe da vista tridimensional.**

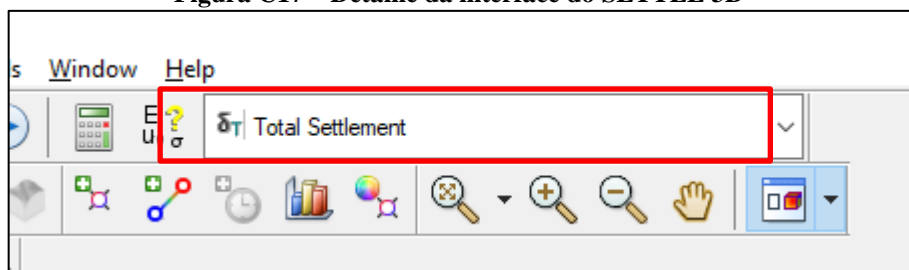


Fonte: Autor.


Você também pode clicar, no canto inferior direito na aba *View Controls*, em *Deformed Contours* para visualizar o recalque em todo o terreno do aterro. É possível mudar a profundidade do *Grid* na aba *Depth*.

Se você desejar visualizar outros resultados além do recalque, pode modificar a visualização na parte superior, onde inicialmente está selecionado *Total Settlement*, como mostra a Figura C 17.

**Figura C17 – Detalhe da interface do SETTLE 3D®**

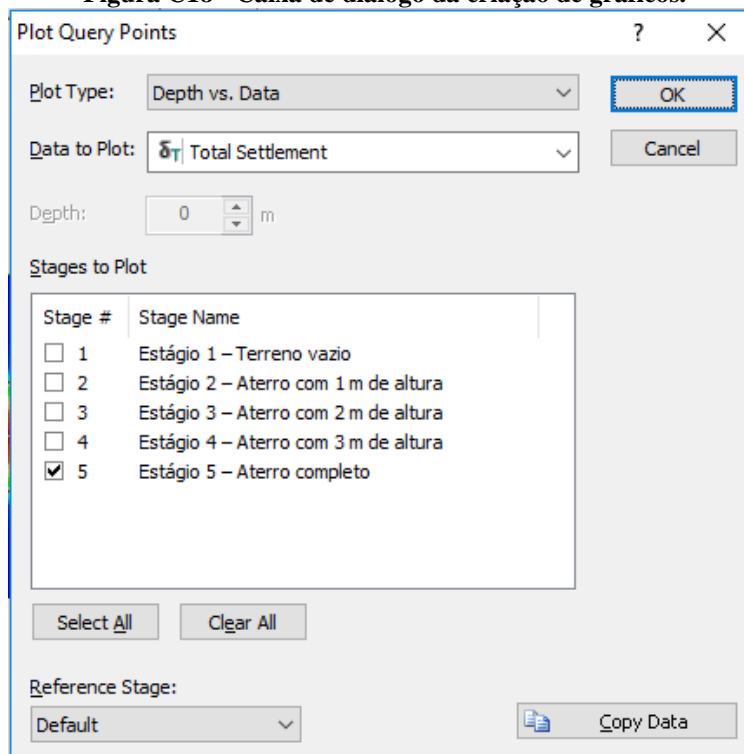


Fonte: Autor.

Também é possível visualizar os gráficos relativos a esses dados clicando em  e determinando o ponto de dados ao qual esse gráfico será referido, o estágio e o dado que apresentado no gráfico (ver Figura C 18).

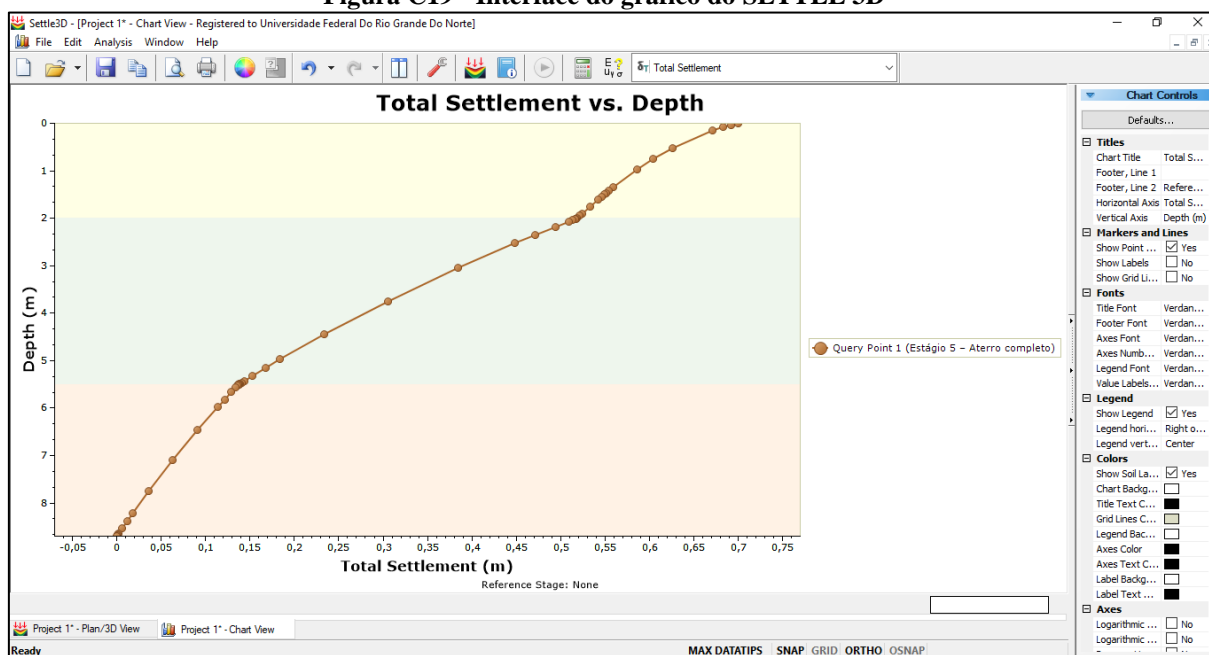
O gráfico construído se parece com a Figura C 19.

**Figura C18 - Caixa de diálogo da criação de gráficos.**



Fonte: Autor.

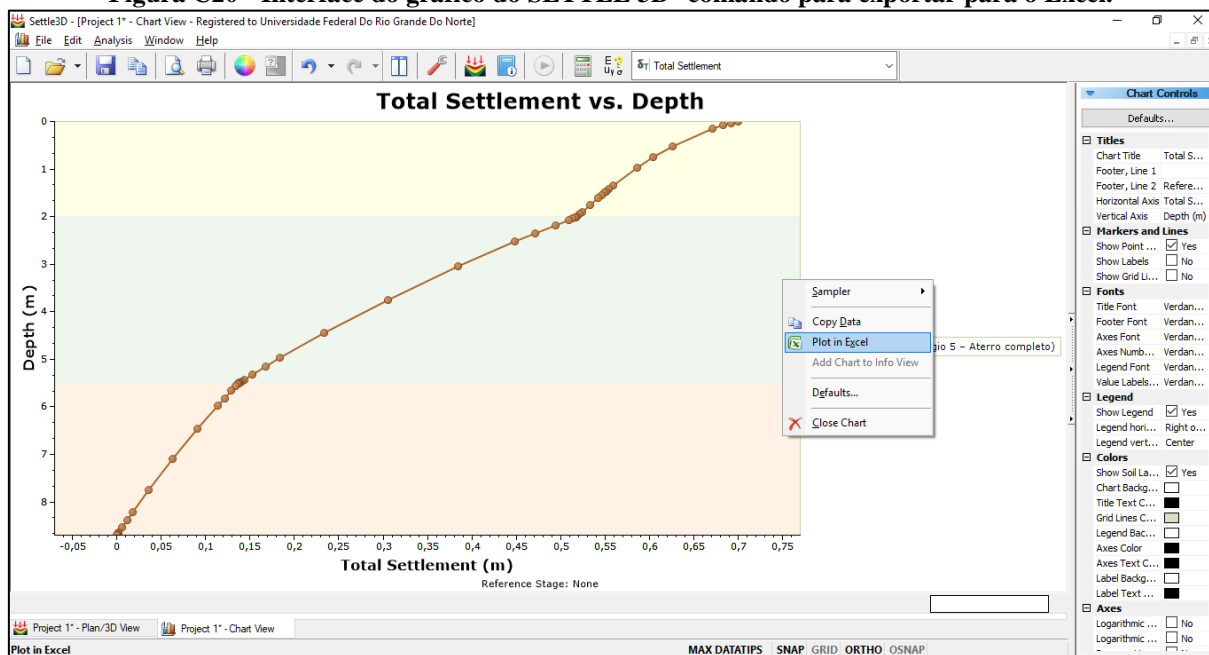
Figura C19 - Interface do gráfico do SETTLE 3D®



Fonte: Autor.

Por fim, é possível exportar os dados para o Microsoft Excel clicando com o botão direito do mouse sobre o gráfico e selecionando *Plot in Excel*.

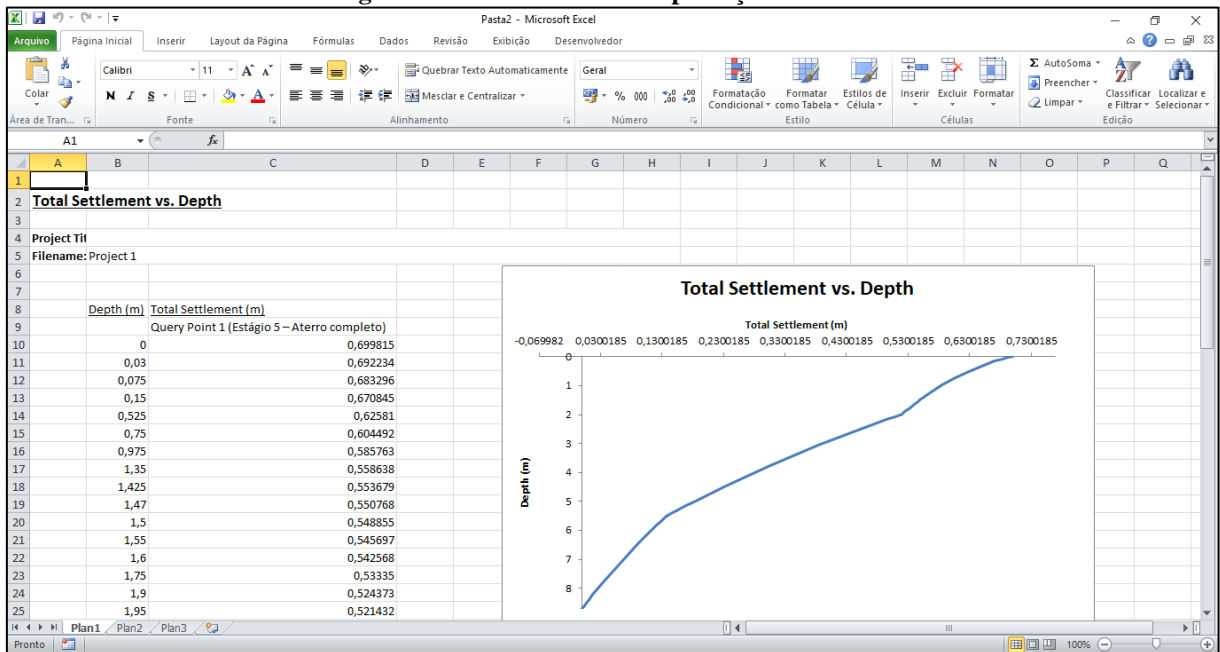
Figura C20 - Interface do gráfico do SETTLE 3D® comando para exportar para o Excel.



Fonte: Autor.

A planilha resultante é similar à Figura C 21.

**Figura C21 – Resultado da exportação no Excel.**



Fonte: Autor.