

Universidade Federal do Rio de Janeiro

**ESTUDO DE VIABILIDADE TÉCNICA E
ECONÔMICA PARA PROJETO GEOTÉCNICO DE
ATERRO SOBRE SOLO MOLE – APLICAÇÃO AO
CASO DO TRECHO RODOVIÁRIO RAMO 300,
BARRA DA TIJUCA, RIO DE JANEIRO**

Henrique Urzedo Rocha Madeira

2016



Universidade Federal
do Rio de Janeiro

Escola Politécnica

ESTUDO DE VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA PARA PROJETO GEOTÉCNICO DE ATERRO SOBRE SOLO MOLE – APLICAÇÃO AO CASO DO TRECHO RODOVIÁRIO RAMO 300, BARRA DA TIJUCA, RIO DE JANEIRO

Henrique Urzedo Rocha Madeira

Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro.

Orientadores: Marcos Barreto de Mendonça
Alessandra Conde de Freitas

Rio de Janeiro
ABRIL DE 2016

ESTUDO DE VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA PARA
PROJETO GEOTÉCNICO DE ATERRO SOBRE SOLO MOLE –
APLICAÇÃO AO CASO DO TRECHO RODOVIÁRIO RAMO
300, BARRA DA TIJUCA, RIO DE JANEIRO

Henrique Urzedo Rocha Madeira

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL DA ESCOLA POLITÉCNICA DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE
ENGENHEIRO CIVIL.

Examinado por:

Prof^a. Alessandra Conde de Freitas, D.Sc.

Prof. Luís Otávio Cocito de Araújo, D.Sc.

Prof. Marcos Barreto de Mendonça, D.Sc.

Prof^a. Maria Cristina Moreira Alves, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

ABRIL de 2016

Madeira, Henrique Urzedo Rocha

Estudo de viabilidade técnica e econômica para projeto geotécnico de aterro sobre solo mole – aplicação ao caso estudado do trecho rodoviário Ramo 300, Barra da Tijuca, Rio de Janeiro/ Henrique Urzedo Rocha Madeira – Rio de Janeiro: UFRJ/ ESCOLA POLITÉCNICA, 2016.

VII, 57p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Marcos Barreto de Mendonça e
Alessandra Conde de Freitas

Projeto de Graduação – UFRJ/POLI/Curso
de Engenharia Civil, 2016.

Referências Bibliográficas: p. 57

1.Aterros Sobre Solos Moles. 2.Drenos

Agradecimentos

Agradeço aos meus pais, Ernesto Cesar Fonseca Madeira e Christianne Rudge Urzedo Rocha, já que eles sempre estiveram presentes em todos os meus sucessos e fracassos com apoio incondicional.

Agradeço à minha segunda laranja, Isadora Saggin Cecatto, por me ensinar tanto sobre os aspectos não exatos da vida e compartilhar momentos de alegria e tristeza ao longo desses quase cinco anos.

Agradeço ao meu orientador, Marcos Barreto de Mendonça, por me acompanhar desde a época de iniciação científica e se mostrar sempre solícito em todos os momentos.

Agradeço à minha co-orientadora Alessandra Conde de Freitas, a quem tive a infelicidade de conhecer apenas no meu último período.

Agradeço aos meus grandes amigos e colegas da Engenharia Civil, Andre Guy, Eduardo Macedo, Isaac Balster, Lucas Baptista e Thomas Porto. Espero continuar contando com todos após o término do curso e tenho certeza que será um grupo de excelentes profissionais.

“And in the end, the love you take is equal to the love you make”

-Lennon/McCartney

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica/UFRJ como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Engenheiro Civil.

Henrique Urzedo Rocha Madeira

Abril /2016

Orientadores: Marcos Barreto de Mendonça e Alessandra Conde de Freitas

Curso: Engenharia Civil

O projeto nomeado como Ramo 300 é uma das obras complementares de infraestrutura rodoviária vinculadas à construção do corredor expresso para ônibus (BRT) TransCarioca, na cidade do Rio de Janeiro, RJ.

Após terem sido constatadas espessas camadas de solos moles, caracterizados por baixa resistência, elevada compressibilidade e baixa permeabilidade, foi necessário o estudo de uma solução geotécnica para permitir a execução de um aterro sobre o local. Apesar da solução para a execução do Ramo 300 já ter sido executada, foi realizado um estudo de viabilidade técnica e econômica de soluções alternativas. As soluções consideradas para a execução do aterro foram o emprego de sobrecarga temporárias e drenos verticais.

Quanto à análise técnica, discorre-se sobre o desenvolvimento de uma ferramenta computacional, que considera dois tipos de técnicas de construção sobre solos moles: a sobrecarga temporária e o uso de drenos verticais. A ferramenta possibilita a previsão da evolução do recalque (primário e secundário) ao longo do tempo devido à construção de um aterro sobre solo mole para cada solução. A ferramenta não contempla a análise de estabilidade do talude. Quanto à análise econômica, foi realizado um comparativo de custos das soluções consideradas. O trabalho apresentou, como conclusão, para fins unicamente acadêmicos, uma solução alternativa para a construção do Ramo 300 que fosse técnica e economicamente viável, ou seja, que pudesse ser executada dentro do prazo e do orçamento disponíveis para o empreendimento. Entre as soluções consideradas a que se mostrou mais viável foi a associação de sobrecarga temporária e drenos verticais.

Palavras-Chave: Solos moles, Sobrecarga temporária, drenos verticais, aterros, TransCarioca.

Abstract of Undergraduate Project presented to POLI / UFRJ as a partial fulfilment of the requirements for the degree of Civil Engineering.

Henrique Urzedo Rocha Madeira

April /2016

Advisors: Marcos Barreto de Mendonça e Alessandra Conde de Freitas

Course: Civil Engineering

The project named “Ramo 300” is a complementary construction linked to the BRT TransCarioca, in Rio de Janeiro, RJ.

After observing great layers of soft clay, with low capacities of load supporting, high compressibility and low permeability, a geotechnical solution was necessary for the execution of an embankment over it. Although the solution is already done, it was decided to study alternative solutions, considering both technical and economic aspects. The examined solutions were a temporary overload and vertical drains.

As to the technical aspect, this work discusses the development of a computational tool. The tool permits the user to estimate the evolution of the primary and secondary soil settlements throughout time due to an embankment built over the soft clay. The tool does not provide a stability analysis. As to the economical aspect, both solutions mentioned had their costs compared.

Using this tool, this work has presented, for academic purposes, an alternative solution for the construction of “Ramo 300” that was viable both technically and economically. The most viable solution was to combine the solution with the temporary overload with the vertical drains.

Key Words: Soft clay, temporary overload, vertical drains, embankment.

Sumário

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Considerações iniciais	1
1.2. Objetivo.....	1
1.3. Organização do trabalho.....	2
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1. Solos moles	4
2.1.1. Definição e características gerais	4
2.2. Soluções para execução de aterros sobre solos moles.....	6
2.3. Cálculo de deformações verticais.....	11
2.4. Adensamento.....	14
2.4.1. Adensamento primário.....	14
2.4.2. Adensamento secundário	17
2.4.3. Consideração de submersão	17
2.4.4. Consideração de grandes deformações.....	19
2.5. Emprego de sobrecarga temporária.....	19
2.6. Emprego de drenos verticais	20
2.7. Análises de viabilidade.....	23
2.7.1. Viabilidade econômica.....	23
2.7.2. Prazo executivo.....	24
3. DESENVOLVIMENTO DA FERRAMENTA COMPUTACIONAL	26
3.1. Introdução	26
3.2. Tutorial para uso da ferramenta	26
3.3. Validação da ferramenta.....	35
4. ESTUDO DAS SOLUÇÕES PARA A EXECUÇÃO DE ATERRO SOBRE SOLOS MOLES NO TRECHO RODOVIÁRIO RAMO 300.....	36
4.1. O caso estudado – Ramo 300	36
4.2. Análise de viabilidade técnica e econômica das soluções.....	38
4.2.1. Considerações iniciais.....	38
4.2.2. Aterro convencional.....	39
4.2.3. Aplicação da sobrecarga temporária	40
4.2.4. Aplicação dos drenos verticais.....	40
4.2.5. Aplicação dos drenos verticais com sobrecarga temporária.....	47
4.2.6. Considerações finais	52
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS, PRINCIPAIS CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES DE TRABALHOS FUTUROS	54
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	57

1. INTRODUÇÃO

1.1. Considerações iniciais

Os solos moles ou muito moles são caracterizados como solos argilosos saturados, com baixíssima resistência ao cisalhamento, alta compressibilidade e baixa permeabilidade, apresentando, quando carregados, tempo de adensamento muito elevado, podendo durar muitos anos ou décadas, o que, às vezes, compromete o prazo requerido para o término da obra. Tal fato leva os engenheiros a pensarem em técnicas construtivas para acelerar, minimizar ou até evitar esse fenômeno.

Esse é um tipo de solo recorrente em obras no Brasil, uma vez que são encontrados ao longo da costa do país e – particularmente – no estado do Rio de Janeiro. O motivo da escolha desse tema foi a participação do autor desse trabalho em atividades de iniciação científica sobre a obra de infraestrutura viária do Ramo 300, parte complementar ao BRT TransCarioca, que consiste em um trecho em aterro sobre solo mole, o que suscitou estudos sobre opções de soluções para a execução de tal obra.

A escolha do tipo de solução a ser adotada para execução de uma obra de aterro sobre solo mole (ou muito mole) depende basicamente da sua exequibilidade técnica, do orçamento e do prazo disponíveis. O dimensionamento técnico da solução é baseado em teorias da engenharia geotécnica, braço da engenharia civil destinada ao estudo de solos e rochas. Basicamente deve se definir uma solução que permita que o recalque ocorra num prazo aceitável para a entrega da obra e que seja garantida a segurança quanto a sua estabilidade. O orçamento é realizado com base nos processos construtivos utilizados em cada solução, e os prazos são estimados considerando-se os tempos requeridos em cada alternativa adotada.

1.2. Objetivo

O objetivo geral do trabalho é realizar o estudo de análise técnica e econômica para o projeto geotécnico de execução de aterro sobre solo mole para o caso da obra do Ramo 300, na Barra da Tijuca, Rio de Janeiro.

Tem-se como objetivo específico o desenvolvimento de uma ferramenta computacional utilizando a linguagem de programação do Excel (VBA) para calcular o recalque a ser sofrido pela camada de solo mole de modo a atingir-se o greide requerido no projeto, bem como o tempo necessário para sua ocorrência, considerando-se os seguintes métodos construtivos:

- Aterro convencional (Figura 1-1a);
- Aterro convencional com sobrecarga temporária (Figura 1-1b);
- Aterro sobre drenos verticais (Figura 1-1c);
- Aterro sobre drenos verticais associados a sobrecarga temporária (Figura 1-1d).

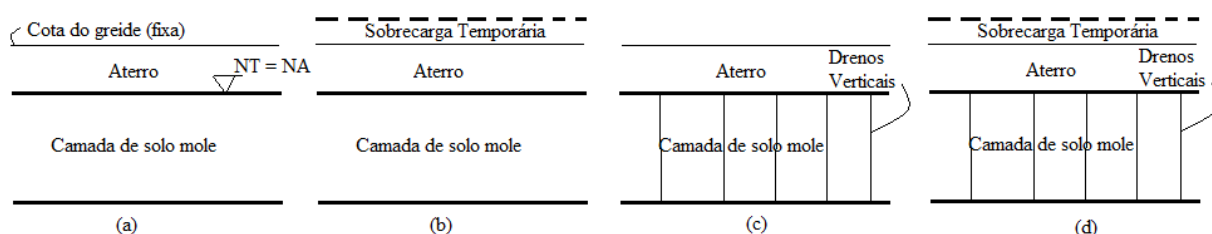


Figura 1-1: Métodos construtivos considerados na ferramenta computacional: (a) Aterro convencional. (b) Aterro convencional com sobrecarga temporária. (c) Aterro sobre drenos verticais. (d) Aterro sobre drenos verticais associados a sobrecarga temporária

A ferramenta foi validada inicialmente com base em caso teórico disponível na literatura e – em seguida – empregada ao caso do Ramo 300. Também foram elaborados – com base nos resultados do programa – orçamentos das soluções com drenos verticais – Figura 1-1 (c) – e com a combinação entre drenos e sobrecarga temporária – Figura 1-1 (d). Além disso, foram estimados os prazos de execução dos dois casos citados para que fosse possível uma tomada de decisão.

A ferramenta, em seu estágio atual, não contempla a análise da estabilidade dos taludes do aterro, fazendo parte do plano de continuidade dessa linha de trabalho.

1.3. Organização do trabalho

O presente trabalho é organizado em cinco capítulos: Introdução, Revisão Bibliográfica, Desenvolvimento da Ferramenta Computacional, Caso Estudado e Considerações Finais.

O primeiro capítulo pretende apresentar e descrever brevemente o contexto do trabalho, seus objetivos e a metodologia empregada.

O segundo capítulo fornece um embasamento teórico dos assuntos abordados. Nele, são apresentados a definição de solos moles, as soluções para execução de aterros sobre esses solos, os métodos de cálculo dos recalques e tempos de adensamento. Dá-se ênfase, também, às soluções com sobrecarga temporária e drenos verticais. Em seguida, é descrita a metodologia utilizada para análise de viabilidade econômica do projeto.

O terceiro capítulo aborda o desenvolvimento da ferramenta computacional que é utilizada para os cálculos dos recalques e dos tempos de adensamento. É apresentada mostra toda a memória de cálculo do programa e um tutorial de como usá-lo.

O quarto capítulo apresenta o caso estudado. São mostrados todos os dados considerados no cálculo e os resultados finais para cada solução geotécnica adotada. Assim, pôde ser realizada uma comparação entre as soluções baseada na evolução dos recalques, orçamento e prazo do projeto.

O quinto capítulo trata das considerações finais do trabalho e principais conclusões acerca dos resultados obtidos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Solos moles

2.1.1. Definição e características gerais

Solos moles são solos de origem sedimentar, saturados e prioritariamente argilosos. Quando carregados, solos moles sofrem elevadas deformações verticais devidas a elevada compressibilidade. Possuem, também, baixíssima permeabilidade, o que demanda longo período de tempo para que as deformações ocorram, o que pode comprometer o prazo de execução de determinadas obras de engenharia civil.

Segundo PINTO (2006), os solos podem ser classificados como moles a partir dos seguintes critérios:

- Índice de consistência (IC) < 0,5 (Tabela 2-1):

$$IC = \frac{LL - w}{LL - LP} \quad (2-1)$$

Onde:

LL = Limite de Liquidez;

w = teor de umidade;

LP = Limite de Plasticidade.

Índice de consistência	Consistência da argila
< 0,5	Mole
0,5 a 0,75	Média
0,75 a 1	Rija
> 1	Dura

Tabela 2-1 – Consistência da argila em função do índice de consistência (adaptada de PINTO, 2006).

- $N_{SPT} \leq 5$ (Tabela 2-2):

O número N do SPT mede a resistência a penetração do solo. É definido pelo número de golpes necessários para cravar 30 cm do amostrador, após 15 cm iniciais (PINTO, 2006).

Resistência à penetração (número N do SPT)	Consistência da argila
< 2	Muito mole
3 a 5	Mole
6 a 10	Consistência média
11 a 19	Rija
> 19	Muito rija

Tabela 2-2 – Consistência da argila em função do número N do SPT (adaptada de PINTO, 2006).

- Resistência à compressão simples ≤ 50 kPa (Tabela 2-3):

A resistência à compressão simples é a carga que leva o corpo de prova representativo do solo à ruptura, dividida pela área desse corpo de prova (PINTO, 2006).

Resistência, em kPa	Consistência da argila
< 25	Muito mole
25 a 50	Mole
50 a 100	Consistência média
100 a 200	Rija
200 a 400	Muito rija
> 400	Dura

Tabela 2-3 – Consistência da argila em função da resistência à compressão simples (adaptada de PINTO, 2006).

A Tabela 2-4 apresenta características e propriedades típicas de argilas moles da região da Barra da Tijuca e do Recreio, região bastante conhecida no município do Rio de Janeiro pela existência de obras de engenharia sobre depósitos de argila mole:

Local	Barra da Tijuca e Recreio (RJ)
Espessuras de argilas muito moles a moles (m)	4 – 20
W_n (%)	100 – 488
L_L (%)	148 – 312
L_p (%)	80 – 192
% argila	26 – 54
Peso específico natural (kN/m³)	10,2 – 13,4
CR = C_c / (1+e₀)	0,4 – 0,8
C_v (m²/s) x 10⁻⁸	0,6 – 8,8
e₀	3,3 – 8,2
S_u (kPa)	3 – 38
N_{kt}	4 - 16

Tabela 2-4 – Exemplo de características de depósito de argila mole e muito mole em área na Barra da Tijuca/Recreio (RJ) (adaptada de ALMEIDA E MARQUES, 2010). Onde: W_n é a umidade natural *in situ*; CR é a razão de compressão; C_c é o índice de compressão; C_v é o coeficiente de adensamento para drenagem vertical; e₀ é o índice de vazios inicial da amostra em laboratório; S_u é a resistência não drenada; N_{kt} é o fator empírico de cone em termos de resistência de ponta.

2.2. Soluções para execução de aterros sobre solos moles

A abordagem a seguir é baseada principalmente em ALMEIDA e MARQUES (2010), que apresentam os métodos construtivos de aterros sobre solos moles para solucionar ou minimizar problemas de recalques e/ou estabilidade de acordo com LEROUÉIL (1997):

A escolha do método construtivo mais adequado está associada a diversas questões: características geotécnicas dos depósitos de solo; cargas envolvidas; tipo de utilização da área, incluindo a vizinhança; prazos construtivos e a verba disponibilizada.

A geometria dos aterros e as características geotécnicas são fatores muito variáveis e a metodologia construtiva deve ser analisada para cada caso

A Figura 2-1 apresenta alguns métodos construtivos de aterros sobre solos moles utilizados para solucionar ou minimizar os problemas de recalques e/ou de estabilidade dos taludes. Alguns métodos contemplam o controle de recalques; outros, o controle de estabilidade. A maioria dos métodos contemplam as duas questões:

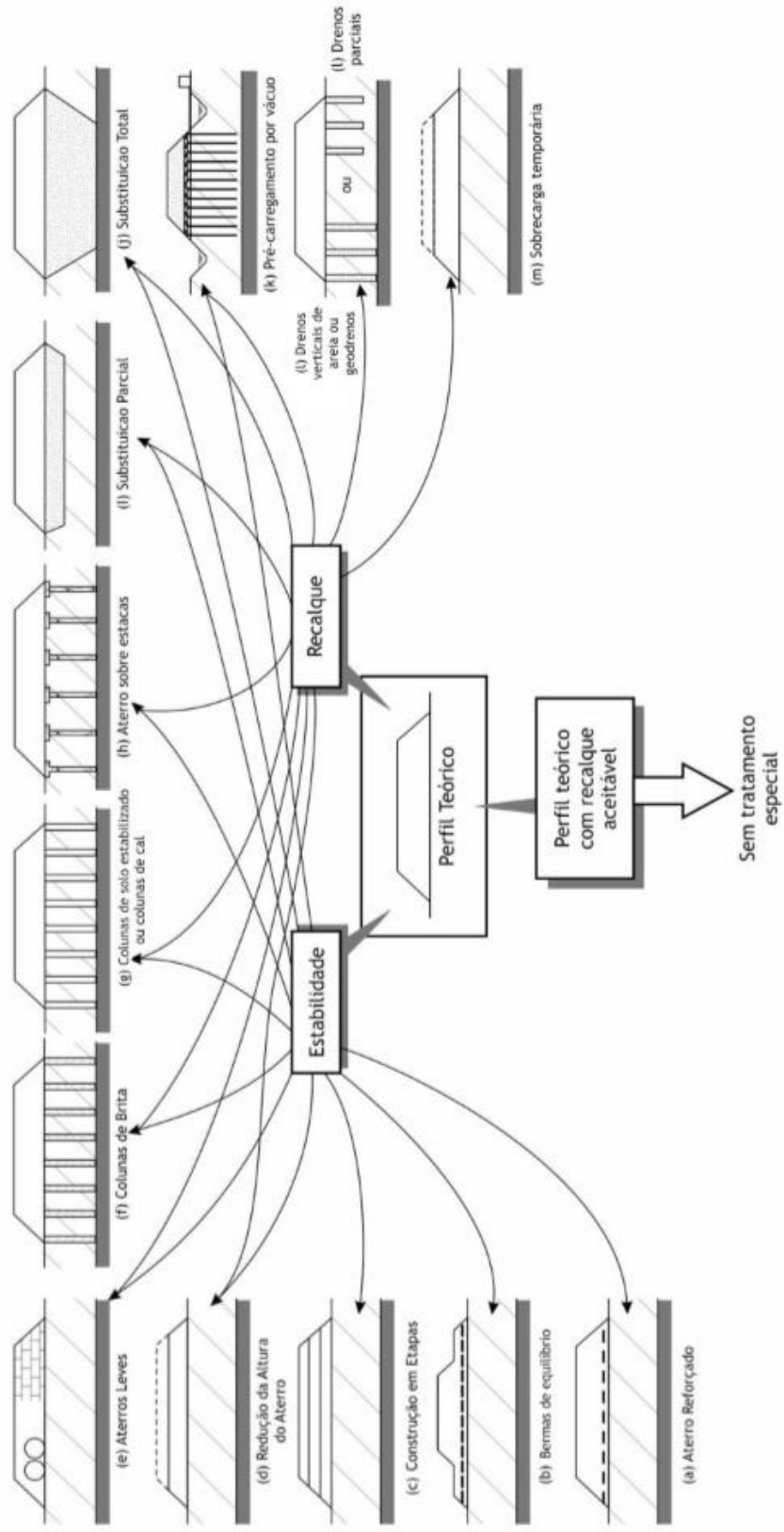


Figura 2-1 – Métodos construtivos de aterros sobre solos moles (ALMEIDA e MARQUES, 2010).

- **Aterro reforçado (Figura 2-1a):**

Nesse caso, são empregados reforços geossintéticos na base do corpo do aterro para garantir a estabilidade dos taludes do mesmo.

- **Bermas laterais e reforço (Figura 2-1b):**

Essa solução consiste na execução de bermas de equilíbrio, que conferem maior estabilidade dos taludes do aterro. Quando existem restrições com relação ao seu comprimento, pode ser necessário utilizar reforços na base do aterro, conforme citado no item anterior.

- **Construção em etapas (Figura 2-1c):**

Quando a resistência não drenada do solo mole é muito baixa, essa alternativa permite um ganho de resistência ao longo do processo executivo, em função da dissipação do excesso de poropressão gerado em cada etapa de carregamento. Porém, a estabilidade precisa ser conferida a cada etapa do processo.

- **Redução da altura do aterro (Figura 2-1d)**

Quando possível, pode se reduzir da altura do aterro, o que demandará uma resistência não drenada menor para a garantia da estabilidade dos taludes.

- **Aterros leves (Figura 2-1e)**

A utilização de materiais leves – isopor, por exemplo – na construção do aterro diminui o acréscimo de tensão vertical no solo, reduzindo a magnitude do recalque associado.

- **Colunas de brita convencionais e encamisadas (Figura 2-1f)**

Esse tipo de tratamento do solo produz menores deslocamentos horizontais e verticais em comparação a um aterro convencional. Além disso, também promove a dissipação de poropressões por drenagem radial.

- **Colunas de solo estabilizado (Figura 2-1g)**

Mesmo princípio das colunas de brita convencionais e encamisadas, porém, com solo estabilizado realizando a função de transferência de carga.

- **Aterro sobre estacas (Figura 2-1h)**

A solução de estaqueamento do aterro permite que a carga seja transferida diretamente a um solo de fundação mais competente mecanicamente. Assim, melhora a condição de estabilidade dos taludes e minimiza recalques.

- **Substituição parcial (Figura 2-1i)**

Consiste na substituição parcial do solo mole utilizando-se equipamentos como escavadeiras ou dragas e na colocação imediata de aterro. É utilizado, em geral, para depósitos de solos moles de até quatro metros. Também melhora a condição de estabilidade e minimiza recalques.

- **Substituição total (Figura 2-1j)**

Consiste na substituição total do solo mole utilizando-se equipamentos como escavadeiras ou dragas e na colocação imediata de aterro. É utilizado, em geral, para depósitos de solos moles de até quatro metros de espessura. Também melhora a condição de estabilidade e minimiza recalques.

- **Pré-carregamento por vácuo (Figura 2-1k)**

Essa solução consiste na colocação de um sistema de drenos verticais e horizontais e aplicação de vácuo no mesmo, que tem efeito equivalente a uma sobrecarga hidrostática, para aumentar a velocidade da expulsão da água, agilizando, assim, os recalques.

- **Drenos verticais (Figura 2-1l)**

A solução com drenos verticais tem como objetivo facilitar a saída de água do solo resultante do excesso de poropressão gerado pelo aterro. Com a sua inserção, uma partícula de água pode percorrer uma distância menor (direção horizontal, até o dreno) do que antes (direção vertical, até a camada drenante).

- **Sobrecarga temporária (Figura 2-1m)**

Em função da aplicação de uma sobrecarga adicional temporária ocorre uma antecipação do recalque devido à sobrecarga do corpo do aterro, reduzindo o tempo necessário para a estabilização do mesmo.

No caso estudado no presente trabalho, a solução adotada na prática foi de aterro sobre estacas. Como opções à essa solução – que serão objetos de estudo do presente trabalho – foram escolhidas duas, drenos verticais e sobrecarga temporária, por serem plausíveis de serem executadas devido a fatores como a viabilidade técnica para caso estudado, o *know-how* executivo, o prazo a ser cumprido e a maior recorrência em obras no país.

2.3. Cálculo de deformações verticais

A compressibilidade do solo é a relação entre a variação de deformação volumétrica e a variação do estado de tensões efetivas ($\Delta V \Rightarrow f(\Delta\sigma')$).

Através do estudo da compressibilidade do solo é possível prever-se a magnitude da deformação sofrida pelo mesmo, função do carregamento aplicado, das condições de contorno do problema e das propriedades do solo. Para tal são realizados ensaios edométricos – em laboratório –, que consistem na compressão de um corpo de prova de uma amostra indeformada de solo em um molde que impede qualquer deformação lateral, simulando uma condição de deformação unidimensional. Para sua realização, uma amostra é colocada em um anel rígido ajustado numa célula de compressão edométrica. O solo fica confinado entre duas pedras porosas, que permitem que a saída da água. Então, aplica-se a carga por intermédio de uma prensa. A Figura 2-2 (PINTO, 2006) ilustra um ensaio edométrico.

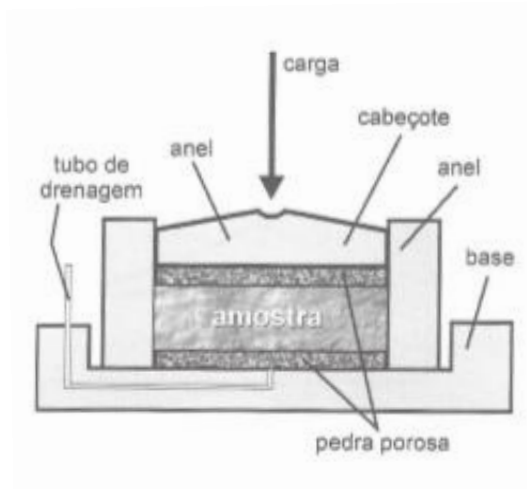


Figura 2-2 – Ilustração de um ensaio edométrico (PINTO, 2006).

Com a realização do ensaio edométrico, é possível elaborar um gráfico de índice de vazios (e) pelo logaritmo da tensão efetiva ($\log(\sigma'_v)$), como o da Figura 2-3, a partir do qual é possível definir algumas características do solo como a razão de sobre adensamento (RSA, em inglês OCR) e os coeficientes de recompressão, de compressão virgem (C_c) e de descompressão (C_s).

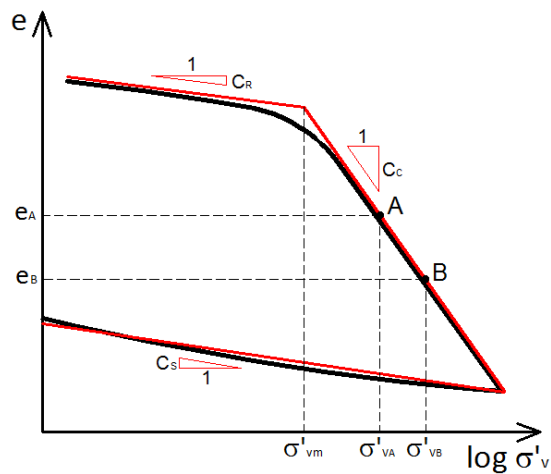


Figura 2-3 – Gráfico típico de e x σ'_v .

A RSA é a razão da tensão de sobre adensamento (σ'_{vm}) sobre a tensão atual (σ'_{v0}) que nos indica um histórico das tensões aplicadas em um solo. Obtém-se a tensão de sobre adensamento (σ'_{vm}) do gráfico utilizando os métodos de Pacheco Silva ou de Casagrande. Se

RSA > 1, por exemplo, diz-se que o solo é sobre adensado, ou seja, em algum momento já houve sobre ele uma tensão maior do que aquela presente no momento da retirada da amostra; se RSA = 1, diz-se que o solo é normalmente adensado, logo nunca houve uma tensão sobre ele maior que a atual. Nesse último caso, o gráfico do ensaio edométrico se aproximará de uma reta, denominada curva virgem.

A partir da inclinação das retas obtidas por aproximações das curvas do gráfico e x log (σ'_v) pode-se obter os coeficientes de recompressão (C_R), compressão virgem (C_C) e descompressão (C_S).

Partindo dessas informações extraídas do gráfico, sabendo a espessura da camada de solo e atendidas algumas hipóteses, é possível estimar o recalque resultante da deformação unidimensional que irá ocorrer:

- Para argilas normalmente adensadas (RSA = 1):

$$\rho = \frac{H}{(1 + e)} \cdot \left[C_C \cdot \log \left(\frac{\sigma'_{v2}}{\sigma'_{v1}} \right) \right] \quad (2-2)$$

- Para argilas sobre adensadas (RSA > 1), com $\sigma'_{v2} = (\sigma'_{v1} + \Delta \sigma'_v) \leq \sigma'_{vm}$:

$$\rho = \frac{H}{(1 + e)} \cdot \left[C_R \cdot \log \left(\frac{\sigma'_{v2}}{\sigma'_{v1}} \right) \right] \quad (2-3)$$

- Para argilas sobre adensadas (RSA > 1), com $\sigma'_{v2} = (\sigma'_{v1} + \Delta \sigma'_v) \geq \sigma'_{vm}$:

$$\rho = \frac{H}{(1 + e)} \cdot \left[C_R \cdot \log \left(\frac{\sigma'_{vm}}{\sigma'_{v1}} \right) + C_C \cdot \log \left(\frac{\sigma'_{v2}}{\sigma'_{vm}} \right) \right] \quad (2-4)$$

Onde:

ρ = dimensão do recalque;

H = altura da camada de solo compressível;

e = índice de vazios do solo;

C_R = índice de recompressão do solo;

C_C = índice de compressão do solo;

σ'_{vm} = tensão de sobre adensamento;

$\Delta\sigma'_v$ = variação da tensão vertical efetiva;

σ'_{v1} = tensão vertical efetiva no meio da camada de solo antes do aterro;

σ'_{v2} = tensão vertical efetiva no meio da camada de solo depois do aterro.

2.4. Adensamento

2.4.1. Adensamento primário

Adensamento é o processo de compressão, tal qual definido anteriormente, do solo saturado ao longo do tempo. Esse fenômeno deve-se à expulsão de água dos vazios do solo, associada à dissipação do excesso de poro-pressão ($\Delta u \downarrow$) gerado pelo carregamento (aterro). Como consequência, ocorre um aumento da tensão efetiva ($\uparrow \sigma' = \sigma - u$) e uma variação de volume ($\Delta V \downarrow$) do solo mensurada, por exemplo, pela redução do índice de vazios do solo.

A Teoria do Adensamento Unidimensional de TERZAGHI E FRÖLICH (1936), citada por TAYLOR (1948), permite prever a evolução do adensamento primário. Ela relaciona características dos solos como permeabilidade e índice de vazios com o carregamento aplicado resultando numa forma de prever o tempo necessário para cada fase da deformação vertical.

Como esse processo é complexo, foi necessário admitir-se as seguintes hipóteses (TERZAGHI E FRÖLICH, 1936):

1. O solo é totalmente saturado

2. A compressão é unidimensional
3. O fluxo da água é unidimensional
4. O solo é homogêneo
5. As partículas sólidas e a água são tidas como incompressíveis
6. O solo pode ser estudado como elementos infinitesimais
7. O fluxo é governado pela Lei de Darcy
8. As propriedades do solo não variam no processo de adensamento
9. O índice de vazios varia linearmente com o aumento da tensão efetiva durante o adensamento

A partir dessas hipóteses, é possível saber como se dá a transferência, ao longo do tempo, do excesso de poropressão, que é igual o acréscimo de tensão total induzida pelo carregamento, para as partículas sólidas, ou seja, para a tensão efetiva ao longo da camada compressível. Esse processo e a teoria que o rege se referem ao adensamento primário do solo.

O grau de adensamento médio na camada de solo (U) é denominado Porcentagem de Recalque. Ele representa a relação entre o recalque sofrido até aquele ponto e o recalque total correspondente ao carregamento (PINTO, 2006). A Tabela 2-5 mostra o Fator Tempo (T) – número adimensional utilizado no cálculo do tempo – em função da Porcentagem de Recalque (U):

U (%)	T	U (%)	T	U (%)	T	U (%)	T	U (%)	T
1	0,0001	21	0,0346	41	0,132	61	0,297	81	0,588
2	0,0003	22	0,0380	42	0,138	62	0,307	82	0,610
3	0,0007	23	0,0415	43	0,145	63	0,318	83	0,633
4	0,0013	24	0,0452	44	0,152	64	0,329	84	0,658
5	0,0020	25	0,0491	45	0,159	65	0,340	85	0,684
6	0,0028	26	0,0531	46	0,166	66	0,351	86	0,712

7	0,0038	27	0,0572	47	0,173	67	0,364	87	0,742
8	0,0050	28	0,0616	48	0,181	68	0,377	88	0,774
9	0,0064	29	0,0660	49	0,189	69	0,389	89	0,809
10	0,0078	30	0,0707	50	0,197	70	0,403	90	0,848
11	0,0095	31	0,0755	51	0,204	71	0,416	91	0,891
12	0,0113	32	0,0804	52	0,212	72	0,431	92	0,938
13	0,0133	33	0,0855	53	0,221	73	0,445	93	0,992
14	0,0154	34	0,0908	54	0,230	74	0,461	94	1,054
15	0,0177	35	0,0962	55	0,239	75	0,477	95	1,126
16	0,0201	36	0,102	56	0,248	76	0,493	96	1,219
17	0,0227	37	0,108	57	0,257	77	0,510	97	1,335
18	0,0254	38	0,113	58	0,266	78	0,528	98	1,500
19	0,0283	39	0,119	59	0,276	79	0,547	99	1,781
20	0,0314	40	0,126	60	0,287	80	0,567	100	∞

Tabela 2-5 – Fator Tempo em função da Porcentagem de Recalque para adensamento pela Teoria de Terzaghi (PINTO, 2006).

A partir da Tabela 2-5, tendo sido definida a Porcentagem de Recalque, consegue-se determinar o Fator Tempo associado a essa porcentagem do fenômeno. Define-se o Fator Tempo (T) como:

$$T = \frac{c_v \cdot t}{H_d^2} \quad (2-5)$$

onde:

c_v = coeficiente de adensamento vertical;

t = tempo;

H_d = maior distância de percolação da água.

A partir da equação 2-5, consegue-se obter o tempo de adensamento correspondente às propriedades do solo e do carregamento.

2.4.2. Adensamento secundário

Segundo MARTINS (2005), o fenômeno conhecido como adensamento secundário refere-se às deformações que ocorrem principalmente ao fim do adensamento primário e que não podem ser atribuídas à dissipação dos excessos de poro-pressão (pequenos) ainda remanescentes no corpo de prova.

LOUISE (2011) cita MARTINS, SANTA MARIA e LACERDA (1997), que propõem para a estimativa do recalque por adensamento secundário de argilas de alta plasticidade no Rio de Janeiro a seguinte expressão:

$$\rho_s = \frac{H}{1 + e_0} (C_c - C_R) \log 2 \quad (2-6)$$

2.4.3. Consideração de submersão

Quando ocorre o recalque do aterro, parte do mesmo passa a ficar abaixo do nível do terreno original. A teoria do adensamento unidimensional de Terzaghi e Frölich não considera a possibilidade de submersão do aterro quando esse atinge o nível d'água devido à deformação do solo. MARTINS E ABREU (2002) abordam esse problema como um alívio da tensão efetiva, ao longo do tempo, devido ao empuxo de água que passa a atuar na parte submersa do aterro, que aumenta conforme o recalque vai ocorrendo. Isso ocorre em virtude das bacias sedimentares, que usualmente apresentam os solos de maior compressibilidade, possuírem o nível de água extremamente elevado (LOUISE, 2011).

Assim, para o cálculo da tensão efetiva final, é utilizado um processo iterativo utilizando as equações 2-4, 2-7 e 2-8. A Figura 2-4 ajuda na visualização:

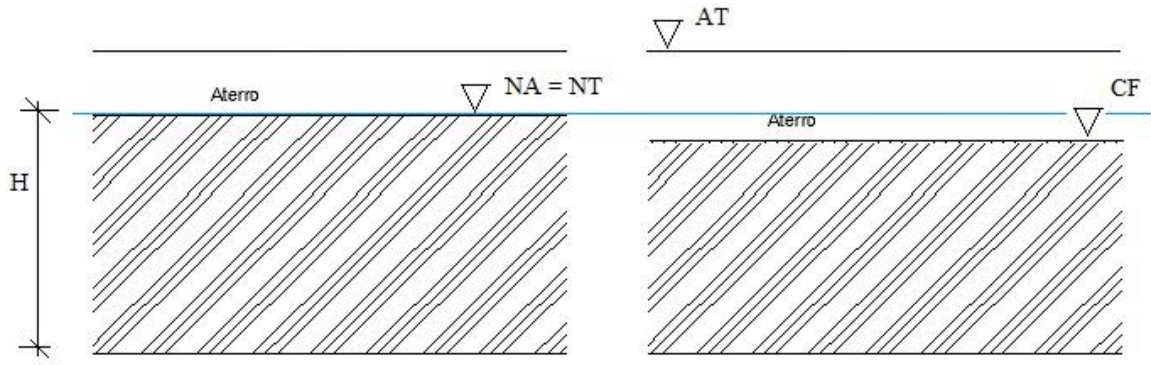


Figura 2-4 – Esquema representativo do modelo de submersão.

$$\sigma'_{vf} = |AT - NA| \times \gamma_{natat} + |NA - CF| \times \gamma_{subat} + \frac{H}{2} \times \gamma_{subsolo} \quad (2-7)$$

$$CF = NT - \rho \quad (2-8)$$

onde:

σ'_{vf} = tensão vertical efetiva final no centro da camada de solo;

AT = cota final do topo do aterro, mantida fixa ao longo do processo iterativo;

NA = cota do nível d'água;

γ_{natat} = peso específico natural do aterro;

CF = cota final do topo da camada de solo;

γ_{subat} = peso específico submerso do aterro;

H = espessura inicial da camada de solo;

$\gamma_{subsolo}$ = peso específico submerso da camada de solo;

NT = cota inicial do topo da camada de solo;

ρ = recalque ocorrido.

2.4.4. Consideração de grandes deformações

A teoria do adensamento unidimensional de Terzaghi e Frölich tem como uma de suas hipóteses a consideração de pequenos deslocamentos e deformações, que resultem em recalques por adensamento da ordem de 10% da espessura da camada compressível (LOUVISE, 2011). Contudo, é frequente encontrar caso que superam esse limite, tornando-se necessário que se encontre uma maneira de calcular o efeito dessas grandes deformações.

Para a abordagem dessas situações, MARTINS E ABREU (2002) apresentam um método no qual considera-se a diminuição da altura de drenagem com o processo do adensamento. Assim, utiliza-se a teoria clássica do adensamento em etapas e calcula-se fatores tempo (T_i^*) modificados, onde i é o módulo do percentual de adensamento decorrido. Para isso, calcula-se o tempo t_i , que é o tempo para a ocorrência de $i\%$ do processo entre a i -ésima e a i -ésima+ n iteração, onde n é o incremento percentual de adensamento entre as iterações. Considera-se $n=5\%$ como um valor que apresenta resultados satisfatórios de T^* (LOUVISE, 2011). Então, tem-se:

$$T_{i+n}^* = (T_{i+n} - T_i) \left\{ 1 - \left[\frac{(i+n)\%}{2} + \frac{i\%}{2} \right] \varepsilon_v \right\}^2 + T_i^* \quad (2-9)$$

Onde:

$$\varepsilon_v = \frac{\rho}{H} \quad (2-10)$$

2.5. Emprego de sobrecarga temporária

A aplicação de sobrecarga (superior a carga de projeto) temporária tem como objetivo aumentar a velocidade dos recalques. O funcionamento é simples: quanto maior a carga, maior a redução dos vazios ao longo do tempo – ou seja, para o mesmo período de tempo após a aplicação da carga, o adensamento será maior do que sem a sobrecarga (Figura 2-5). Então, quando o recalque ocorrido for igual ao final previsto para a altura de aterro desejada (altura de projeto), retira-se o excesso, restando apenas o aterro desejado em cima do solo.

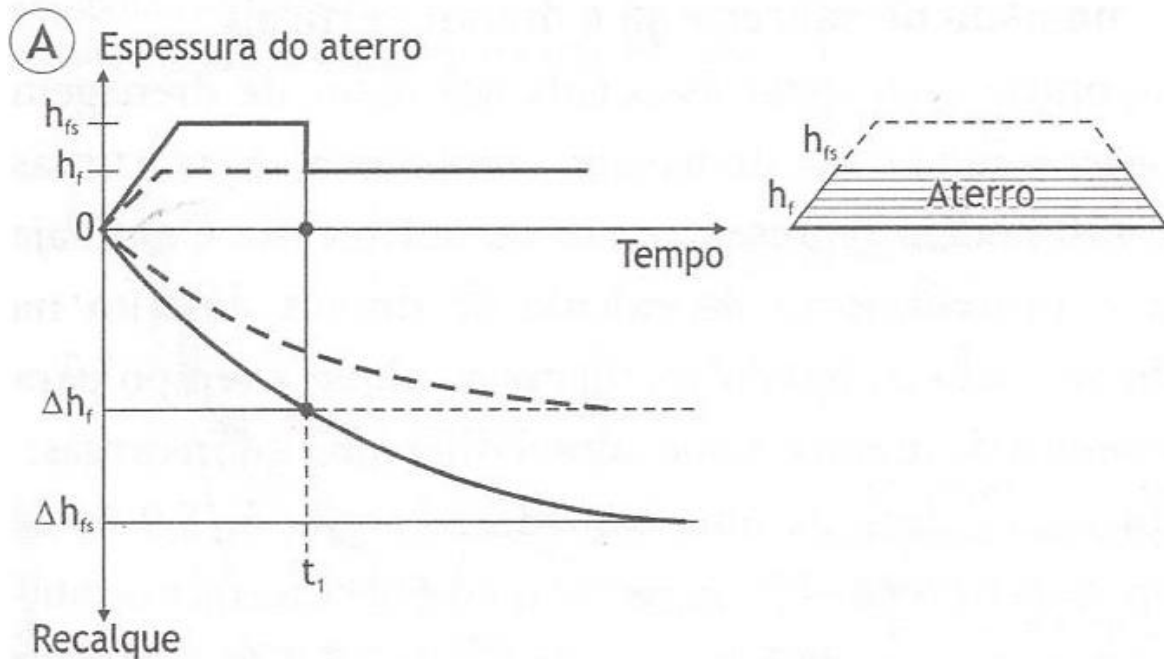


Figura 2-5 – Gráfico comparativo do recalque de aterros com (linha tracejada) ou sem sobrecarga (linha cheia) (ALMEIDA E MARQUES, 2010).

As principais desvantagens desse método são os prazos para estabilização dos recalques, que devido à baixa permeabilidade dos depósitos moles, podem não atender aos prazos da obra. Além disso, o volume de terraplenagem associado a empréstimo e bota-fora pode ser grande demais.

2.6. Emprego de drenos verticais

Existem alguns tipos de drenos utilizados, tais como os geodrenos – constituídos por materiais sintéticos – e drenos de areia e/ou brita. Os geodrenos são cravados verticalmente no terreno e dispostos em uma malha que pode ser do tipo quadrada (Figura 2-6a) ou triangular (Figura 2-6b). Isso permite que ocorra drenagem radial da água presente na argila mole quando esta está submetida a um excesso de poropressão. A água percola horizontalmente entre os drenos verticais e são, então, conduzidas verticalmente para o colchão drenante. Como ocorre uma redução da distância de drenagem na camada de argila mole, há aceleração dos recalques. A Figura 2-7 mostra o esquema da solução com geodrenos:

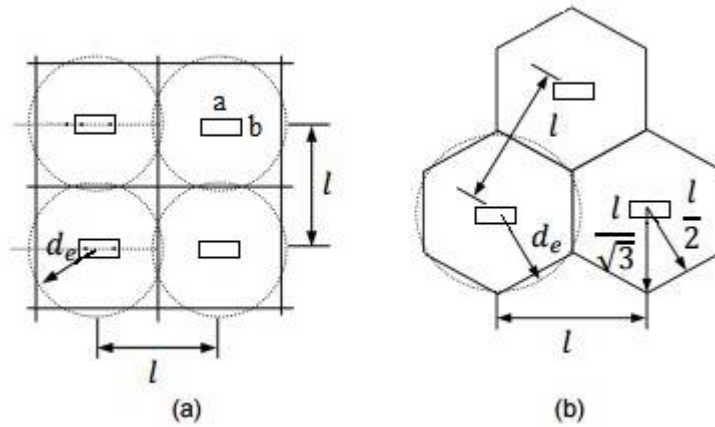


Figura 2-6 – Disposição das malhas de geodrenos: (a) malha quadrada; (b) malha triangular (adaptado de ALMEIDA E MARQUES, 2010).

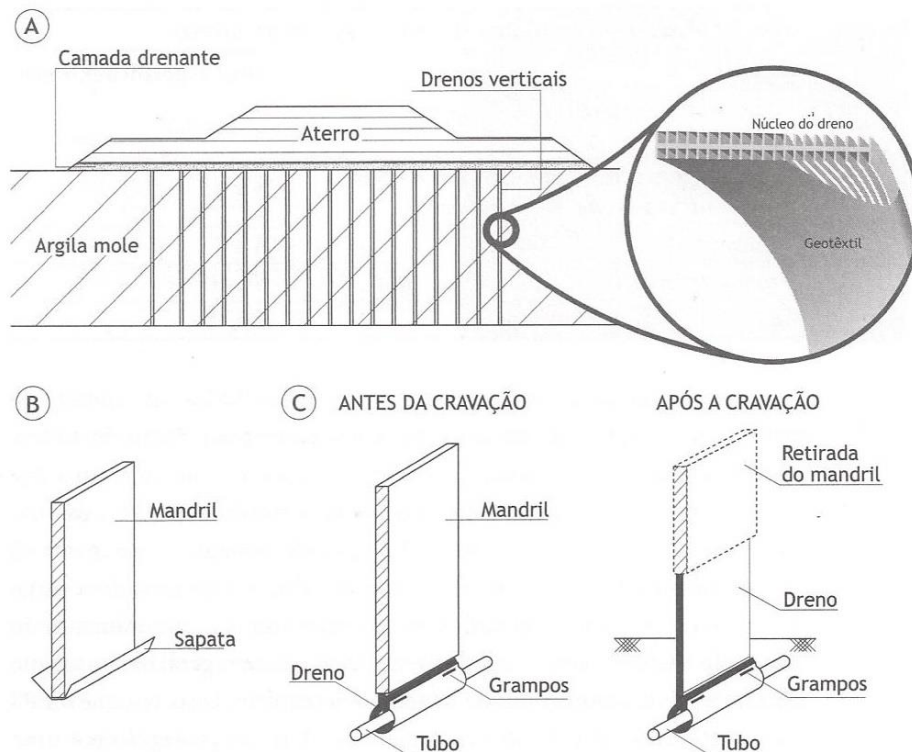


Figura 2-7 – Esquema da solução com geodrenos (ALMEIDA E MARQUES, 2010).

Para implantação dessa solução é preciso calcular os diâmetros de influência e efetivo dos drenos através das relações a seguir.

Dispondo-os em uma malha, iguala-se a área de um quadrado de lado l com a área de um círculo equivalente tem-se o diâmetro de influência por:

$$d_e = l \cdot \sqrt{\frac{4}{\pi}} \quad (2-11)$$

Os geodrenos, em geral, são de seção transversal retangular com dimensões a e b conhecidas, porém devem ser representados por um círculo equivalente de mesmo perímetro, cujo diâmetro é calculado como:

$$d_w = 2 \frac{(a + b)}{\pi} \quad (2-12)$$

Como considera-se – nesse caso – a drenagem radial, BARRON (1948) propõe um novo cálculo para o cálculo da Porcentagem de Adensamento e do Fator Tempo:

$$U_h = 1 - e^{-\left[\frac{8T_h}{F(n)}\right]} \quad (2-13)$$

Onde:

$$T_h = \frac{c_h \cdot t}{d_e^2} \quad (2-14)$$

$$F(n) = \ln(n) - 0,75 \quad (2-15)$$

$$n = \frac{d_e}{d_w} \quad (2-16)$$

Onde:

d_e = diâmetro de influência de um dreno

d_w = diâmetro do dreno ou diâmetro equivalente de um geodreno com seção retangular

T_h = fator tempo para drenagem horizontal

$F(n)$ = função de densidade dos drenos

Para o cálculo do diâmetro de influência de malhas quadradas, tem-se:

$$d_e = 1,13l \quad (2-17)$$

E para malhas triangulares:

$$d_e = 1,05l \quad (2-18)$$

2.7. Análises de viabilidade

2.7.1. Viabilidade econômica

Para a análise de viabilidade econômica, é necessário formular composições de custos para cada serviço envolvido.

As composições de custo (ARAÚJO, 2013) unitário têm como objetivo encontrar um valor monetário – no caso o real (R\$) – por unidade de serviço. A Tabela 2-6 mostra um exemplo.

PINTURA (m ²)					
Descrição	Unidade	Coefficiente	Produtividade	Custo Unit.	Custo Total
Pintor	h	0,1	10	R\$ 30,00	R\$ 3,00
Servente	h	0,1	10	R\$ 15,00	R\$ 1,50
				TOTAL	R\$ 4,50

Tabela 2-6 – Exemplo ilustrativo de composição de custo unitário.

O título da composição indica qual é o serviço discriminado e a sua unidade. A primeira coluna descreve cada componente do serviço, no caso, a mão de obra. A segunda, a unidade de cada componente. A coluna de coeficiente representa o número de unidades do componente necessárias para que o mesmo realize uma unidade da composição. No caso, a quantidade de horas que um pintor precisa para pintar um metro quadrado, por exemplo. Esse valor pode ser medido ou encontrado em bancos de dados que já têm valores médios. A

coluna de produtividade representa o inverso do respectivo coeficiente, ou seja, quantos metros quadrados o pintor pinta por hora.

Então, são calculadas as colunas de custo. A primeira representa o custo por unidade do componente. No exemplo, quantos reais são gastos por hora na contratação de um pintor. O custo total é o unitário multiplicado pelo coeficiente. Assim, somando as linhas dessa última coluna, é obtido o custo total unitário da composição.

Após definir esse valor, fica fácil determinar o custo de cada serviço. Basta multiplicar o custo unitário pela quantidade de serviço requerida.

Somando os valores de todos os serviços, tem-se o custo total do empreendimento – ou de parte do empreendimento, já que serviços posteriores como pavimentação e sinalização não foram considerados – em questão. Os custos relacionados a materiais estão incluídos em cada um dos itens de serviços considerados.

O próximo passo é elaborar os fluxos de caixa com as saídas (custos) – instrumento que indica o volume e período das saídas de capital – para possibilitar a avaliação das flutuações de caixa dos projetos. Com esses valores, é possível realizar análises de Valor Presente Líquido (VPL) – que permite analisar o valor presente de pagamentos futuros com uma determinada taxa de juros – com o intuito de comparar as soluções financeiramente.

Junto com as saídas de caixa, é possível elaborar uma curva com seus valores acumulados – chamada de Curva S.

2.7.2. Prazo executivo

A determinação do prazo de execução dos serviços é fundamental para qualquer estudo de viabilidade na construção civil. A partir dele, é possível montar todo o cronograma da obra e elaborar com acurácia as saídas de caixa.

Como já se tem o valor de coeficiente (inverso da produtividade) de cada componente de serviço, pode-se calcular facilmente o tempo necessário para sua execução. Basta multiplicar o coeficiente pela quantidade de serviço requerida e será obtido o valor do tempo necessário em horas. Desse modo, dividindo esse valor por 8,8 – valor de carga horária diária média considerado – resulta o número de dias necessário para a execução do serviço.

Considerando todos os serviços, estabelecendo a ordem entre eles e a data de início de cada um, é possível obter o gráfico de Gantt (Figura 2-8) do empreendimento.

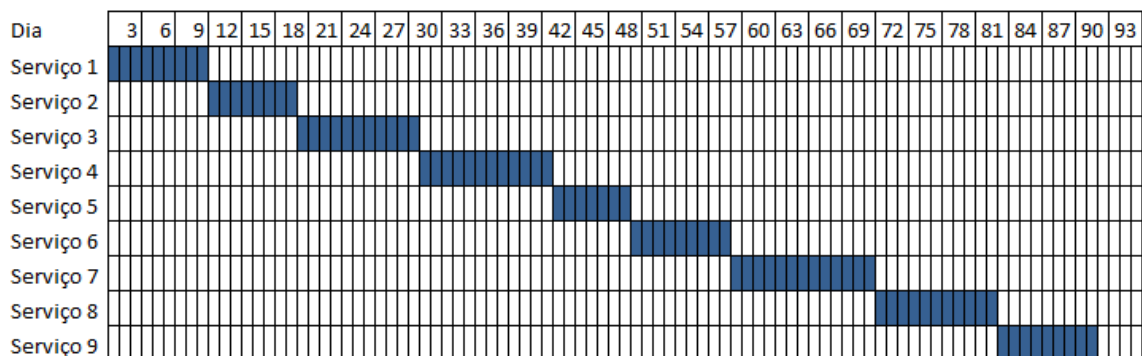


Figura 2-8 – Exemplo de um gráfico de Gantt para um dado empreendimento.

3. DESENVOLVIMENTO DA FERRAMENTA COMPUTACIONAL

3.1. Introdução

Para possibilitar o levantamento do material necessário a execução de uma obra de aterro sobre solos moles e como etapa predecessora do orçamento foi desenvolvido um programa que possibilita basicamente a previsão da magnitude do recalque, assim como o tempo de adensamento quando aplicadas as soluções de sobrecarga de aterro, drenos verticais ou a combinação das duas. O programa funciona para casos onde o perfil geológico possui até cinco camadas diferentes de solo e quando todas as camadas estão sujeitas ao mesmo lençol freático, ou seja, quando a pressão d'água varie linearmente com a profundidade.

Para o cálculo do recalque e sua evolução com o tempo, é levado em consideração o efeito da submersão, grandes deformações e a parcela do adensamento secundário.

Para evidenciar os fatores que mais precisariam ser estudados, foi criado no programa uma ferramenta de análise de sensibilidade. A análise consiste em fazer variar um parâmetro enquanto todos os outros estão fixados e analisar os resultados obtidos através de um gráfico parâmetro x resultado para expor os fatores que mais influenciam no resultado do cálculo do tempo de adensamento.

3.2. Tutorial para uso da ferramenta

- A tela inicial

Na tela inicial (Figura 3-1), existem dois botões que funcionam como hyperlinks. O botão “Previsão de Recalque” leva à análise de previsão de recalque. O botão “Análise de Sensibilidade dos Parâmetros” leva à análise de sensibilidade providenciada pela ferramenta. Em cada uma dessas duas telas há um atalho para voltar à tela inicial.



Figura 3-1 – Tela inicial do programa.

- A tela de previsão de recalque

A Figura 3-2 mostra a tela de previsão de recalque da ferramenta.



RODAR ANÁLISE

INSERIR DADOS

PREVISÃO DE RECALQUE

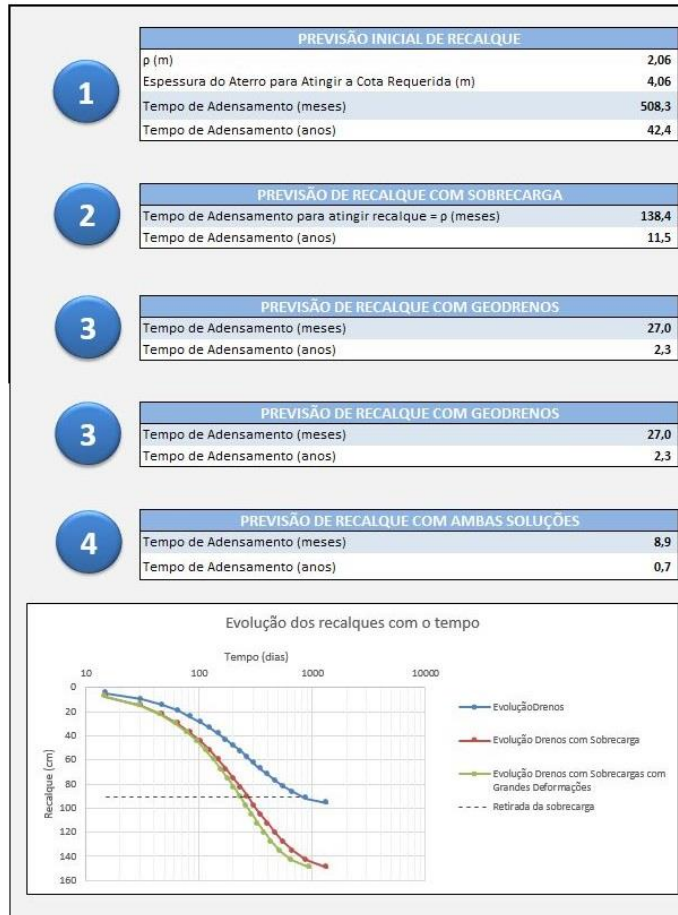


Figura 3-2 – Tela de previsão de recalque.

Para inserir novos dados, deve-se clicar no botão “Inserir Dados”, no canto superior esquerdo. Ao pressioná-lo, o programa guiará o usuário ao longo das etapas necessárias para um novo cálculo. A primeira informação solicitada é a do número de camadas considerado, como mostra a Figura 3-3.

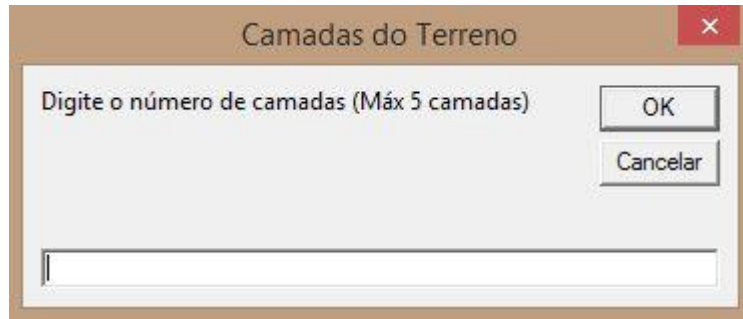


Figura 3-3 – Camadas do Terreno.

Após digitar o número de camadas e apertar “OK”, o usuário deverá inserir os dados geométricos e os parâmetros geotécnicos da(s) camada(s), como mostra a Figura 3-4.

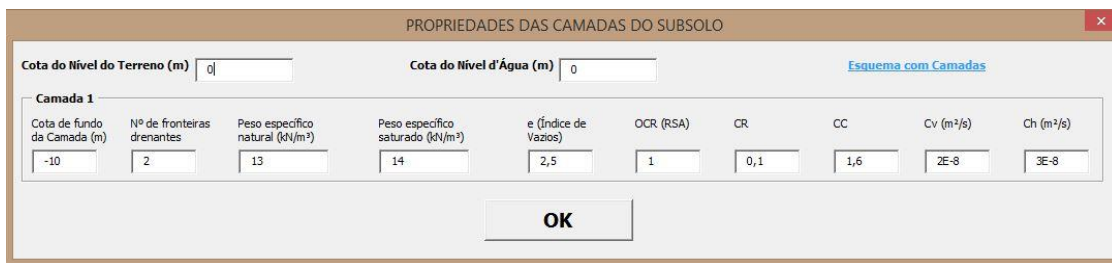


Figura 3-4 – Propriedades das camadas do subsolo.

Nessa tela, o usuário pode clicar em “Esquema com Camadas” – mostrado na Figura 3-5 – para revelar o esquema ilustrativo das camadas de solo, com o objetivo de tornar mais claro a organização considerada.

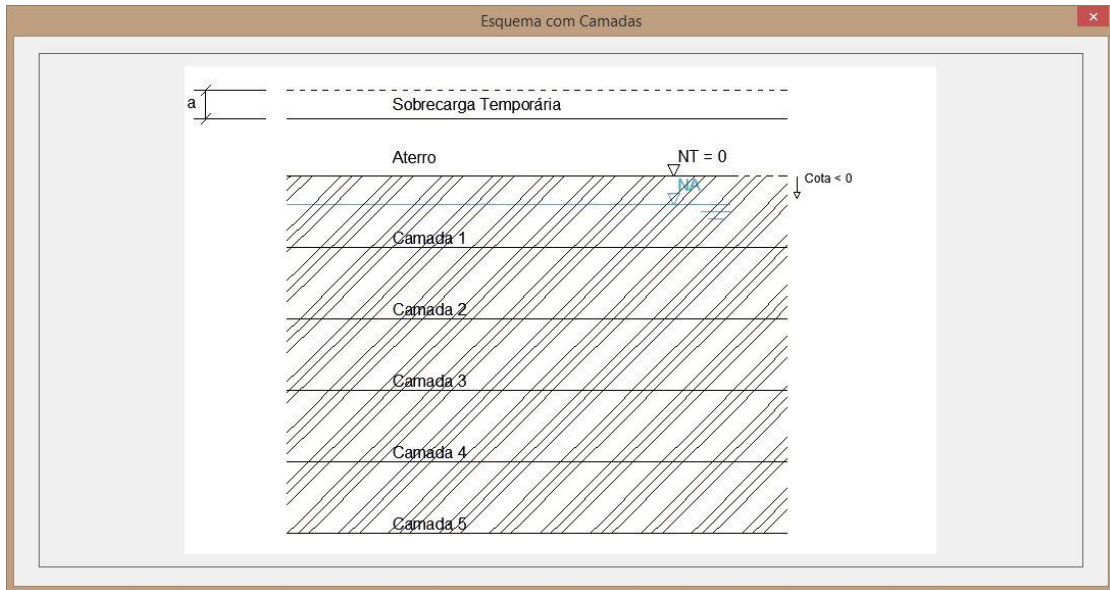


Figura 3-5 – Esquema com camadas.

Para voltar à tela anterior, basta clicar no “x” vermelho no canto superior direito. Em seguida, após inserir os parâmetros do solo e clicar em “OK”, uma tela apresentando as duas soluções (sobrecarga temporária e drenos verticais) e solicitando as informações sobre elas será revelada, como mostra a Figura 3-6.

A tela "PARÂMETROS DE CÁLCULO" apresenta duas soluções para o projeto:

- Solução 1:**
 - Propriedades do Aterro e da Sobrecarga:**
 - Peso específico natural (kN/m³): 17
 - Peso específico saturado (kN/m³): 18
 - Espessura da Sobrecarga (a) (m): 1
 - Condicante de Projeto:**
 - Parcela de recalque admissível após entrega da obra (m)(%)^(*): 0,06
 - Cota final de topo do aterro (Greide) (m)(%)^(*): 3
- Solução 2:**
 - Propriedades do dreno:**
 - Diâmetro do dreno (equivalente) (d_{dv}) (m): 0,065
 - Espaçamento entre drenos (m): 1,5
 - Tipo da Malha: Triangular

Um botão "OK" está centralizado na tela. Na parte inferior, há três diagramas que mostram o aterro em diferentes estágios: "Inicial", "Final da Obra" e "Final do adensamento". Cada diagrama mostra o aterro com camadas e sobrecarga temporária, com setas indicando o recalque em diferentes pontos.

Figura 3-6 – Parâmetros de cálculo.

É importante observar que, na Figura 3-6, existe um parâmetro chamado “Parcela de recalque admissível após entrega da obra” ($P_{admissível}$). Ele será usado para a determinação da porcentagem de adensamento (U) considerada:

$$U = \frac{\rho - P_{admissível}}{\rho} \quad (3-1)$$

Após inserir as informações necessárias e apertar “OK”, a tela de saídas (Figura 3-2) aparecerá novamente com os novos resultados calculados.

Nessa tela (Figura 3-2), são apresentadas as saídas da última utilização do programa. As saídas foram organizadas em cinco partes:

- 1) Previsão inicial de recalque, com o recalque total sofrido pela camada em metros, a espessura final do aterro para atingir a cota determinada na entrada do programa e o tempo de adensamento em meses e anos (sem a utilização de nenhuma das soluções geotécnicas propostas);
- 2) Tempo de adensamento para atingir recalque final em meses e anos para a solução com sobrecarga temporária;
- 3) Tempo de adensamento para atingir recalque final em meses e anos para a solução com a utilização de drenos verticais;
- 4) Tempo de adensamento para atingir recalque final em meses e anos para a solução com a utilização de drenos verticais combinada com sobrecarga temporária;
- 5) Gráfico da evolução dos recalques com o tempo mostrando os cenários com drenos verticais com e sem sobrecarga temporária, com drenos verticais e sobrecarga temporária com a consideração de grandes deformações e uma reta indicando o momento de retirada da sobrecarga.

Para voltar à tela inicial, basta clicar na seta azul ao lado de “PREVISÃO DE RECALQUE”.

- Análise de sensibilidade

A Figura 3-7 mostra a tela de análise de sensibilidade. Essa tela permite ao usuário realizar uma análise de sensibilidade utilizando os parâmetros inseridos no programa para visualizar com facilidade a influência da variação desse parâmetro no tempo de adensamento calculado e, porventura, alterá-lo. Os parâmetros para os quais podem ser feitas análises são: Nível d'água, cota final do topo do aterro, espessura da sobrecarga, d_w , espaçamento entre os drenos, índice de vazios do solo, RSA, C_R , C_C , c_v , c_h , parcela de recalque admissível após entrega da obra, peso específico natural do aterro e do solo e o peso específico saturado do aterro e do solo.

A tela mostra quatro quadros com gráficos tempo x parâmetro. Cada um correspondente a uma solução geotécnica adotada. Em cada uma é apresentada a meta que deve ser cumprida (reta verde tracejada) em termos de tempo para a entrega da obra para facilitar a avaliação da solução e do valor adotado do parâmetro.

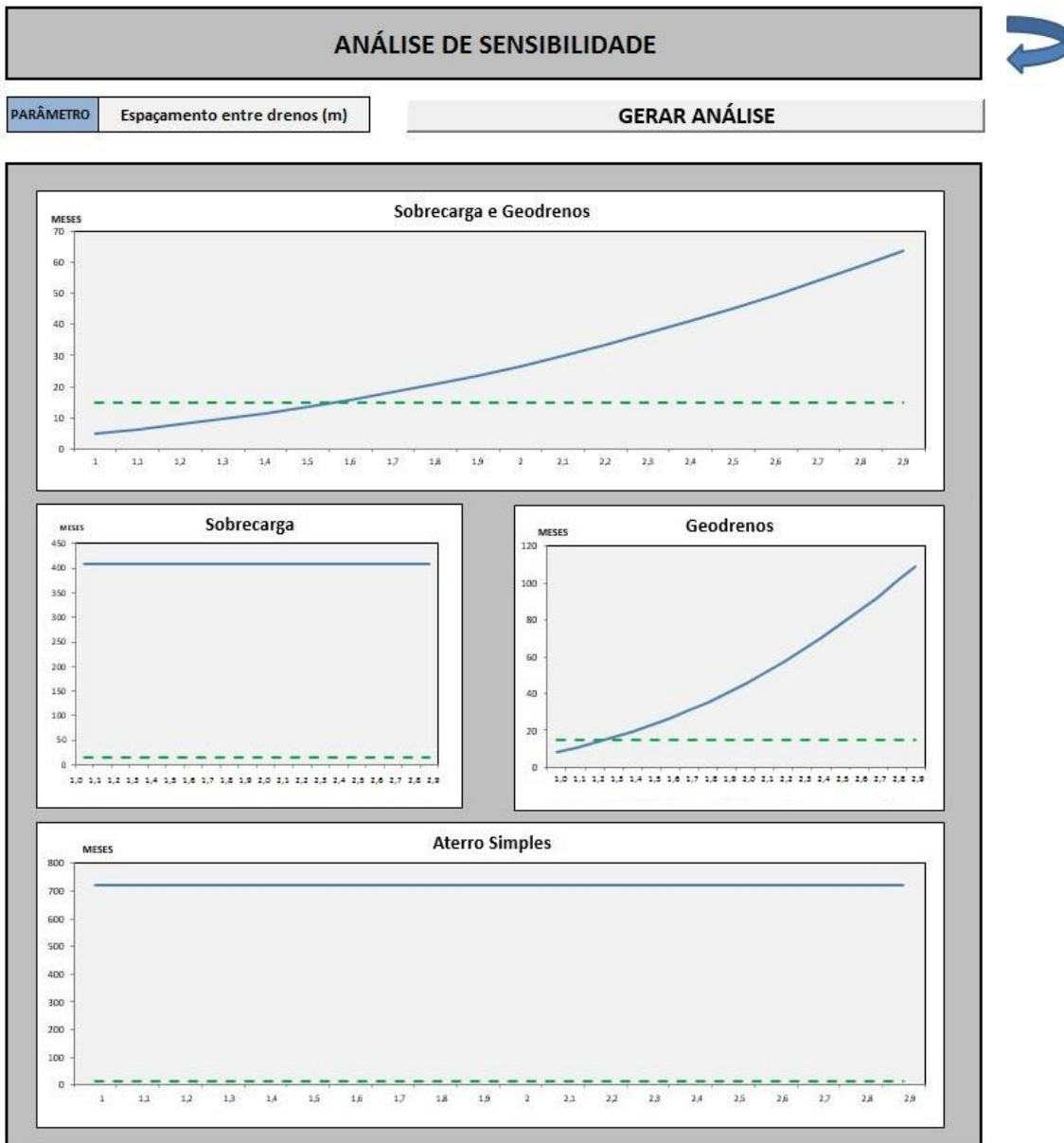


Figura 3-7 – Tela de análise de sensibilidade (meses x metro de espaçamento).

Ela apresenta a última análise realizada. No caso, apenas um exemplo. Para uma nova análise, basta selecionar o parâmetro cuja variação se deseja verificar clicando na célula contendo o parâmetro (no caso da Figura 3-7 “Espaçamento entre os drenos (m)”) e escolhendo o desejado na lista que irá aparecer. Em seguida, deve-se clicar em gerar análise para que o programa solicite as informações necessárias, quando deverá ser informada a amplitude da variação com os valores final e inicial. Então, será solicitado o incremento de variação e, finalmente, a meta a ser atingida, como mostram as Figuras 3-8, 3-9, 3-10 e 3-11. Ao apertar “OK”, os resultados estarão disponíveis nos gráficos para análise.

ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

Valor inicial do parametro:

OK

Cancelar

[Empty text input field]

Figura 3-8 – Valor inicial do parâmetro.

ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

Valor final do parametro:

OK

Cancelar

[Empty text input field]

Figura 3-9 – Valor final do parâmetro.

ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

Incremento:

OK

Cancelar

[Empty text input field]

Figura 3-10 – Valor do incremento.

ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

Qual é o prazo, em meses, de execução do serviço?

OK

Cancelar

[Empty text input field]

Figura 3-11 – Meta a ser atingida.

3.3. Validação da ferramenta

Para a validação da ferramenta, foi utilizado o caso estudado por LOUVISE (2011), que também considerou grandes deformações, submersão e adensamento secundário e cujos parâmetros eram:

- Camada única de argila mole de 10 metros;
- Cota de superfície de aterro de + 2,0 metros;
- Nível de água coincidente com o do terreno;
- Parâmetros da argila mole:
 - $\gamma_{\text{sat}} = 14 \text{ kN/m}^3$;
 - $C_C = 1,58$;
 - $C_R = 0,21$;
 - $e_0 = 2,75$;
 - $c_v = 2 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ (médio para todo o processo);
 - $\text{OCR} = 2$;
 - $\text{OCR}_{\text{sec}} = 2$.
- Parâmetros do aterro:
 - $\gamma_{\text{nat}} = 18 \text{ kN/m}^3$.

Como resultado, foram encontrados por LOUVISE (2011) recalques de 2,43 metros e tempos de adensamento – para $U = 95\%$ – da ordem de 30.000 dias.

Utilizando a ferramenta computacional desenvolvida no presente trabalho com os mesmos dados de entrada, foram obtidos os mesmos resultados.

4. ESTUDO DAS SOLUÇÕES PARA A EXECUÇÃO DE ATERRO SOBRE SOLOS MOLES NO TRECHO RODOVIÁRIO RAMO 300

4.1. O caso estudado – Ramo 300

O Ramo 300 é uma das obras complementares de infraestrutura rodoviária que estão vinculadas à construção do corredor expresso para ônibus (BRT) TransCarioca, na cidade do Rio de Janeiro, RJ. Trata-se de uma ligação entre as avenidas Ayrton Senna e João Cabral de Melo Neto, situadas no bairro da Barra da Tijuca, que tem duas faixas em sentido único, que começam na Av. Ayrton Senna, passam por baixo das pontes que atravessam a Lagoa de Jacarepaguá, atravessam uma área de proteção permanente e terminam na Av. João Cabral de Melo Neto, principal via da região da Península.

A construção do corredor BRT TransCarioca foi condicionada à melhoria da capacidade viária da Av. Ayrton Senna, através da eliminação dos semáforos e dos cruzamentos que existiam na via. Tais ações tornaram necessárias novas ligações e retornos que foram feitos através de dois mergulhões no início da avenida, próximos ao terminal Alvorada, quatro passarelas exclusivas à pedestres, ao longo da via, e uma avenida aberta por baixo das pontes que cruzam a lagoa de Jacarepaguá, refazendo a ligação do tráfego oriundo da Linha Amarela à região da Península (Figura 4-1).

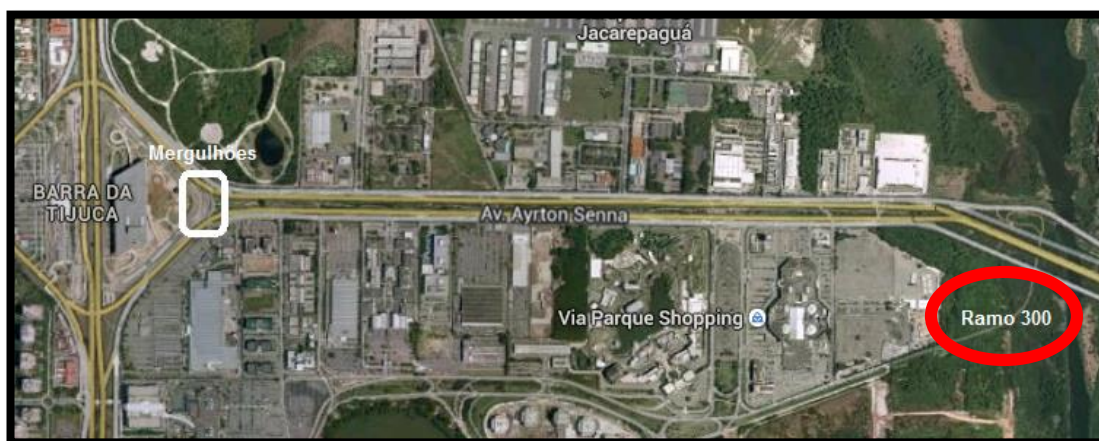


Figura 4-1 – Vista aérea da Av. Ayrton Senna (Google Earth).

O bairro da Barra da Tijuca é uma região de baixada, pertencente à Baixada de Jacarepaguá, onde se localizam as lagoas da Tijuca, de Marapendi e de Jacarepaguá. Essa região apresenta características topográficas e geológicas que evidenciam as formações de solos argilosos moles, o que torna a construção no local um desafio de engenharia.

Os parâmetros utilizados nas análises foram obtidos com base em dados disponíveis na literatura (ALMEIDA E MARQUES, 2010) relacionados a obras próximas ao Ramo 300. Muitas dessas características foram levantadas na obra de construção do Sesc/Senai da Barra da Tijuca, que fica a menos de 1km de distância do solo estudado. Os valores obtidos foram:

- Parâmetros da argila mole:
 - $\gamma_{\text{sat}} = 13 \text{ kN/m}^3$;
 - $C_C = 1,64$;
 - Número de fronteiras drenantes = 2
 - $C_R = 0,20$;
 - $e_0 = 2,4$;
 - $c_v = 1,7 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$;
 - $c_h = 5,0 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$;
 - $\text{OCR} = 1$.

A partir de sondagens no terreno, determinou-se que:

- A camada de argila era de 18 metros;
- Camada de turfa de 1,7 metro;
- O nível d'água coincidia com o do terreno.

Os parâmetros de projeto considerados foram:

- Cota final do topo do aterro de + 2,0 metros;
- Espessura da sobrecarga temporária de 2,0 metros;
- Espaçamento entre os drenos de 1,5 metro;
- Diâmetro equivalente dos drenos (d_w) de 65 milímetros;
- Parcela de recalque admissível após entrega da obra de 0,06 metros;

- Distribuição da malha dos drenos: Triangular;
- γ_{nat} do aterro = 18 kN/m³ (aterro).

4.2. Análise de viabilidade técnica e econômica das soluções

4.2.1. Considerações iniciais

Para a análise técnica do projeto, foi utilizada a ferramenta desenvolvida. Dessa maneira, foi estimada a magnitude do recalque a ser sofrido pela camada de argila mole e a sua evolução com o tempo.

Para a análise econômica, foram elaboradas as composições unitárias apresentadas na Tabela 4-1, baseadas em SCO (2014):

DESMATAMENTO (m ²)					
Descrição	Unidade	Coefficiente	Produtividade	Custo Unit	Custo Total
Trator sobre esteiras, diesel, potência 185hp(138kW), fator de carga médio, lâmina angulável de capacidade de 3,93m ³ - Vida Útil 8.000h	h	0,0035	285,71	R\$ 140,00	R\$ 0,49
Servente (desonerado)	h	0,014	71,43	R\$ 12,50	R\$ 0,18
				TOTAL / m²	R\$ 0,67

ESCAVAÇÃO E CARGA, TRANSPORTE E DISPOSIÇÃO FINAL - CONSIDERANDO M ³ NA SEÇÃO (m ³)					
Descrição	Unidade	Coefficiente	Produtividade	Custo Unit	Custo Total
Servente (desonerado)	h	0,025	40	R\$ 12,50	R\$ 0,31
Caminhão	h	0,13154433	7,602	R\$ 90,00	R\$ 11,84
Royalt	m ³	1	1	R\$ 10,00	R\$ 10,00
Escavadeira	h	0,0125	80	R\$ 120,00	R\$ 1,50
				TOTAL / m³	R\$ 23,65

ATERRO E COMPACTAÇÃO - AREIA (INCLUINDO FORNECIMENTO) - (ATERRO DE CONQUISTA) (m ³)					
Descrição	Unidade	Coefficiente	Produtividade	Custo Unit	Custo Total
Servente (desonerado)	h	0,08	12,5	R\$ 12,50	R\$ 1,00
Areia grossa lavada	m ³	1	1	R\$ 67,23	R\$ 67,23
Rolo compactador autopropelido vibratório com pneus de tração, cilindro liso em aço, diesel, potência 150 HP (112 kW), peso operacional 11,20 t, fator de carga médio - vida útil 8.000 h	h	0,0165	60,60606061	R\$ 90,00	R\$ 1,49
Motoniveladora, fator de carga médio, com lâmina reta, potência no volante do motor: 135 HP	h	0,008	125	R\$ 150,00	R\$ 1,20
Caminhão Irrigadeira (20.000 litros)	h	0,008	125	R\$ 50,00	R\$ 0,40
Trator sobre esteiras, diesel, potência 185 HP (138 kW), fator de carga médio, com lâmina angulável, capacidade da lâmina de 3,93 m - vida útil 8.000 h	h	0,008	125	R\$ 140,00	R\$ 1,12
				TOTAL / m³	R\$ 72,44

ATERRO E COMPACTAÇÃO - BRITA (INCLUINDO FORNECIMENTO) - (ATERRO DE CONQUISTA) (m³)					
Descrição	Unidade	Coefficiente	Produtividade	Custo Unit	Custo Total
Servente (desonerado)	h	0,08	12,5	R\$ 12,50	R\$ 1,00
Brita zero	m³	1	1	R\$ 87,42	R\$ 87,42
Rolo compactador autopropelido vibratório com pneus de tração, cilindro liso em aço, diesel, potência 150 HP (112 kW), peso operacional 11,20 t, fator de carga médio - vida útil 8.000 h	h	0,0165	60,60606061	R\$ 90,00	R\$ 1,49
Motoniveladora, fator de carga médio, com lâmina reta, potência no volante do motor: 135 HP	h	0,008	125	R\$ 150,00	R\$ 1,20
Trator sobre esteiras, diesel, potência 185 HP (138 kW), fator de carga médio, com lâmina angulável, capacidade da lâmina de 3,93 m - vida útil 8.000 h	h	0,008	125	R\$ 140,00	R\$ 1,12
				TOTAL / m³	R\$ 92,23

REBAIXAMENTO NA (h)					
Descrição	Unidade	Coefficiente	Produtividade	Custo Unit	Custo Total
Bomba de drenagem submersa, elétrica, potência 3.6 HP (27 kW), capacidade 14 l/s - vida útil 20 mil h	h	1,00	1,00	R\$ 80,00	R\$ 80,00
				TOTAL / h	R\$ 80,00

ATERRO E COMPACTAÇÃO - SAIBRO (INCLUINDO FORNECIMENTO) - (CORPO DO ATERRO) (m³)					
Descrição	Unidade	Coefficiente	Produtividade	Custo Unit	Custo Total
Servente (desonerado)	h	0,08	12,50	R\$ 12,50	R\$ 1,00
Caminhão Irrigadora (20.000 litros)	h	0,008	125	R\$ 50,00	R\$ 0,40
Rolo compactador autopropelido vibratório com pneus de tração, cilindro pé-de carneiro em aço, diesel, potência 150 HP (112 kW), peso operacional 11.601, fator de carga médio - vida útil 8.000 h	h	0,008	125	R\$ 90,00	R\$ 0,72
Trator sobre pneus, diesel, potência 92 HP (68 kW)-vida útil 8.000 h	h	0,01	125	R\$ 120,00	R\$ 0,96
Grade de disco rebocável, faixa de trabalho 3.5 m - vida útil 20.000 h	h	0,01	100,00	R\$ 4,61	R\$ 0,05
Trator sobre esteiras, diesel, potência 185 HP (138 kW), fator de carga médio, com lâmina angulável, capacidade da lâmina de 3,93 m - vida útil 8.000 h	h	0,008	125	R\$ 140,00	R\$ 1,12
Motoniveladora, fator de carga médio, com lâmina reta, potência no volante do motor: 135 HP	h	0,008	125	R\$ 150,00	R\$ 1,20
Saibro	m³	1,00	1,00	R\$ 28,00	R\$ 28,00
				TOTAL / m³	R\$ 33,45

GEOTÊXTIL (ATERRO DE CONQUISTA) (m²)					
Descrição	Unidade	Coefficiente	Produtividade	Custo Unit	Custo Total
Geotêxtil não-tecido(res. bidirecional:20kN/m/densidade:300g/mJ/espessura:2,30mm/largura:2,15m)	m²	1,05	0,95	R\$ 5,98	R\$ 6,28
Servente (desonerado)	h	0,01	100,00	R\$ 12,50	R\$ 0,13
				TOTAL / m²	R\$ 6,40

Tabela 4-1 – Composições de custo.

Para a análise de VPL, foram considerados os períodos do fluxo de caixa e uma taxa de juros anual de 6,8337%, baseado no Índice Nacional de Custo da Construção (INCC-M, FGV) acumulado dos meses de março de 2015 a fevereiro de 2016.

4.2.2. Aterro convencional

As análises referentes à execução do aterro através do método convencional apresentaram os resultados indicados na Figura 4-2.

PREVISÃO INICIAL DE RECALQUE	
p (m)	8,17
Espessura do Aterro para Atingir a Cota Requerida (m)	10,17
Tempo de Adensamento (meses)	4.551,8
Tempo de Adensamento (anos)	379,3

Figura 4-2 – Previsões iniciais

Com uma previsão inicial de recalque de mais de 8 metros e um tempo de adensamento de quase 380 anos, constatou-se o que já se sabia: essa metodologia é inviável diante do cenário apresentado.

4.2.3. Aplicação da sobrecarga temporária

Usando a ferramenta, os resultados para o tempo de adensamento para a solução com sobrecarga temporária são mostrados na Figura 4-3.

PREVISÃO DE RECALQUE COM SOBRECARGA	
Tempo de Adensamento para atingir recalque = p (meses)	2.277,2
Tempo de Adensamento (anos)	189,8

Figura 4-3 – Previsão para solução com sobrecarga temporária.

Em função do elevado tempo necessário para que ocorra o recalque – superior a 189 anos – a alternativa mostrou-se inviável.

4.2.4. Aplicação dos drenos verticais

A Figura 4-4 mostra os resultados para a solução de aterro com drenos verticais.

PREVISÃO DE RECALQUE COM GEODRENOS	
Tempo de Adensamento (meses)	39,8
Tempo de Adensamento (anos)	3,3

Figura 4-4 – Previsão para solução com geodrenos.

Com as composições (Tabela 4-1) e as premissas mostradas na Tabela 4-2, tem-se o orçamento da solução de aterro com drenos verticais na Tabela 4-3.

Premissas	
Empolamento areia/saibro	45%
Extensão da via (m)	630
Largura da via (m)	7
Largura extra (m) [desm.]	3
Largura desmatada (m)	13
Largura extra (m) [aterro]	1,5
Largura do aterro de conquista (m)	10
Altura da camada de turfa (m)	1,7
Altura de Areia do At. Conq. (m)	0,25
Altura de Brita Zero (m)	0,25
Altura do Aterro de Conq. (m)	0,5
Empolamento brita	30%
Espaçamento Geodreno (m)	1,5
Profundidade Geodreno (m)	18
Altura do Aterro (m)	10,2

Tabela 4-2 – Premissas adotadas.

Aterro com geodrenos				
Aterro e compactação (Aterro de conquista) 100%PN	Unidade	Quantidade	Valor Unitário	Valor Total
Desmatamento	m ²	8.190	R\$ 0,67	R\$ 5.446,35
Escavação e carga de solo mole; Transporte de material escavado; Disposição Final	m ³	15.530	R\$ 23,65	R\$ 367.295,81
Aterro e compactação (Areia c/ fornecimento)	m ³	2.284	R\$ 72,44	R\$ 165.423,43
Aterro e compactação (Brita c/ fornecimento)	m ³	2.048	R\$ 92,23	R\$ 188.830,69
Geotêxtil	m ²	18.900	R\$ 6,40	R\$ 121.035,60
Rebaixamento do NA	Unidade	Quantidade	Valor Unitário	Valor Total
Funcionamento da bomba	hora	1.899	R\$ 80,00	R\$ 151.932,13
Perfuração	m	1.260	R\$ 100,00	R\$ 126.000,00
Mobilização e transporte dos equipamentos	vb	1	R\$ 20.000,00	R\$ 20.000,00
Cravação dos geodrenos	Unidade	Quantidade	Valor Unitário	Valor Total
Fornecimento e cravação dos geodrenos MacDrain V	m	62.700	R\$ 6,20	R\$ 388.737,99
Mobilização e transporte dos equipamentos de cravação	vb	1	R\$ 170.000,00	R\$ 170.000,00
Aterro e compactação (Corpo do aterro)	Unidade	Quantidade	Valor Unitário	Valor Total
Aterro e compactação (Saibro c/ fornecimento)	m ³	92.944	R\$ 33,45	R\$ 3.108.613,81
Valor Total				R\$ 4.813.315,80

Tabela 4-3 – Orçamento para alternativa (3) – aterro com geodrenos verticais.

A partir da definição das equipes de trabalho, foi possível determinar os prazos de execução dos serviços (Tabela 4-4) e elaborar um gráfico de Gantt (Tabela 4-5).

Aterro com geodrenos						
Aterro e compactação (Aterro de conquista) 100%PN	Unidade	Quantidade	Descrição da Equipe	Nº Equipes	Prazo (dias)	Prazo
Desmatamento	m²	8.190	1 trator; 4 serventes 1 escavadeira; 10 caminhões; 2 serventes	1	3	29 h
Escavação e carga de solo mole; Transporte de material escavado; Disposição	m³	15.530	2 rolos lisos; 1 trator; 1 pipa; 1 motoniveladora; 10 serventes	2	11	97 h
Aterro e compactação (Areia c/ fornecimento)	m³	2.284	2 rolos lisos; 1 trator; 1 motoniveladora; 10 serventes	2	2	19 h
Aterro e compactação (Brita c/ fornecimento)	m³	2.048	1 motoniveladora; 10 serventes	2	2	17 h
Geotêxtil	m²	18.900	5 serventes	3	7	63 h
Rebaixamento do NA	hora	3.055	-	-	-	-
Cravação dos geodrenos	Unidade	Quantidade	Descrição da Equipe	Nº Equipes	Prazo (dias)	Prazo
Fornecimento e cravação dos geodrenos MacDrain V	m	62.700	-	1	42	-
Mobilização e transporte dos equipamentos de cravação	vb	1	-	1	1	-
Aterro e compactação (Corpo do aterro)	Unidade	Quantidade	Descrição da Equipe	Nº Equipes	Prazo (dias)	Prazo
Aterro e compactação (Saibro c/ fornecimento)	m³	92.944	2 rolos pé-de-carneiro; 1 trator; 1 pipa; 1 motoniveladora; 1 trator pneus c/ grade;	3	28	248 h

Tabela 4-4 – Prazos de execução dos serviços para a alternativa (3) – aterro com geodrenos verticais.

Aterro com drenos	
Serviço	Prazo (dias)
Desmatamento	3
Escavação e carga de solo mole; Transporte de material escavado; Disposição Final	11
Aterro e compactação (Areia c/ fornecimento)	2
Aterro e compactação (Brita c/ fornecimento)	2
Geotêxtil	7
Rebaixamento do NA	0
Fornecimento e cravação dos geodrenos MacDrain V	42
Mobilização e transporte dos equipamentos de cravação	1
Aterro e compactação (Saibro c/ fornecimento)	28

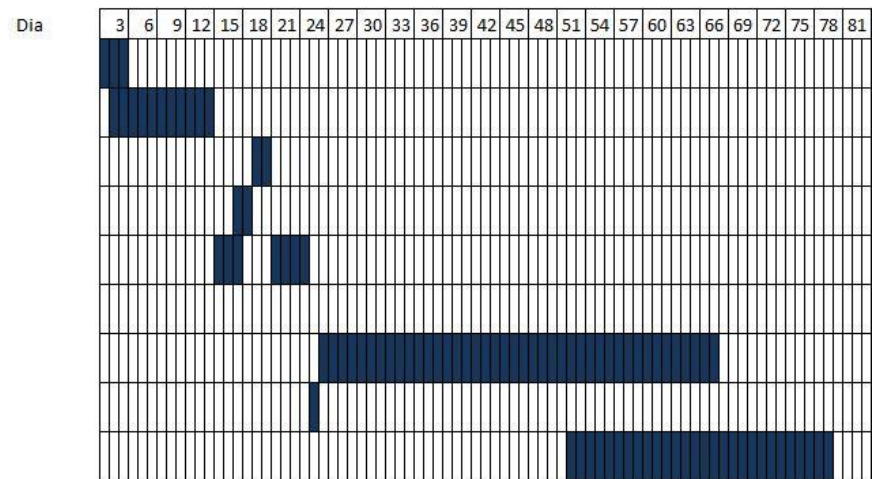


Tabela 4-5 – Prazo requerido para cada serviço e Gráfico de Gantt da alternativa (3) – aterro com geodrenos verticais.

O gráfico de Gantt possibilitou a elaboração do fluxo de saídas de caixa com a curva S e da análise de VPL (Figura 4-5).

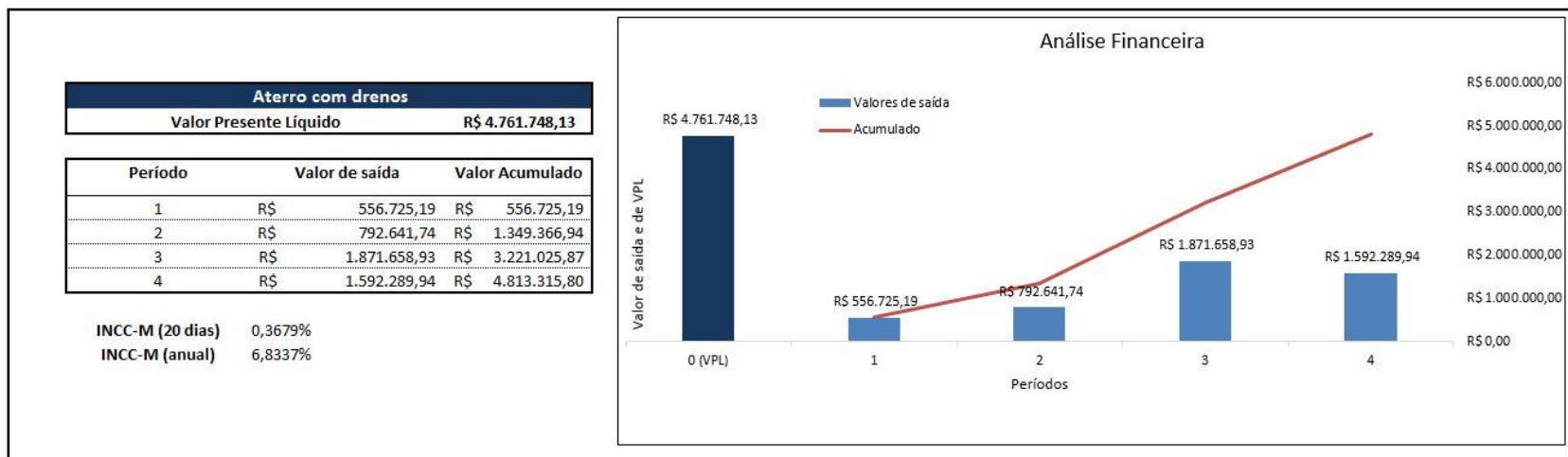


Figura 4-5 – Fluxo de caixa, VPL e Curva S para a alternativa (3) – aterro com geodrenos verticais.

Realizando-se a análise de sensibilidade, recurso disponível na ferramenta (vide item 3.2), estipulou-se, para fins unicamente de exemplificação do recurso, uma meta de 25 meses para o tempo de adensamento. O parâmetro escolhido para ser testado foi o espaçamento entre os drenos (Figura 4-6). Ou seja, para atingir-se a meta estipulada, seria necessário um espaçamento de aproximadamente 1,22 metro.

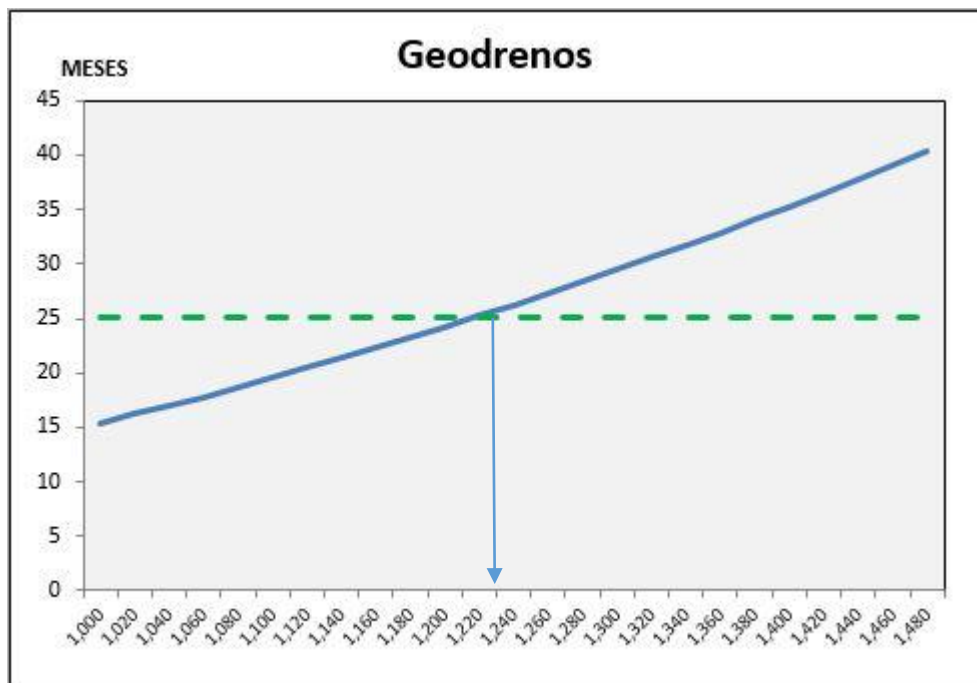


Figura 4-6 – Tempo de adensamento em função do espaçamento entre os drenos com meta fixada em 25 meses.

Após a exposição dos resultados, tem-se um orçamento inicial de R\$ 4.813.315,80 e um prazo – somando o executivo e o de adensamento – de cerca de 3,5 anos. O VPL do projeto foi de R\$ 4.761.748,13 – o que mostra uma influência pequena dessa análise na tomada de decisão.

O prazo necessário estimado é alto e o preço é relativamente baixo. Como a análise da solução seguinte – aterro com sobrecarga temporária e geodrenos verticais – mostrará, com um pequeno acréscimo de capital é possível reduzir drasticamente o tempo necessário.

4.2.5. Aplicação dos drenos verticais com sobrecarga temporária

Finalmente, a Figura 4-7 mostra o cenário com as duas soluções anteriores combinadas.

PREVISÃO DE RECALQUE COM AMBAS SOLUÇÕES	
Tempo de Adensamento (meses)	19,4
Tempo de Adensamento (anos)	1,6

Figura 4-7 – Previsão para a alternativa (4) – aterro com sobrecarga temporária associada a geodrenos verticais.

Com as composições e as premissas mostradas na Tabela 4-6, tem-se o orçamento da solução com drenos verticais na Tabela 4-7.

Premissas	
Empolamento areia/saibro	45%
Extensão da via (m)	630
Largura da via (m)	7
Largura extra (m) [desm.]	3
Largura desmatada (m)	13
Largura extra (m) [aterro]	1,5
Largura do aterro de conquista (m)	10
Altura da camada de turfa (m)	1,7
Altura de Areia do At. Conq. (m)	0,25
Altura de Brita Zero (m)	0,25
Altura do Aterro de Conq. (m)	0,5
Empolamento brita	30%
Espaçamento Geodreno (m)	1,5
Profundidade Geodreno (m)	18
Altura do Aterro com sobrecarga (m)	12,2
Altura da remoção de sobrecarga (m)	2

Tabela 4-6 – Premissas adotadas.

Aterro com geodrenos e sobrecarga				
Aterro e compactação (Aterro de conquista) 100%PN	Unidade	Quantidade	Valor Unitário	Valor Total
Desmatamento	m²	8.190	R\$ 0,67	R\$ 5.446,35
Escavação e carga de solo mole;Transporte de material escavado;Disposição Final	m³	15.530	R\$ 23,65	R\$ 367.295,81
Aterro e compactação (Areia c/ fornecimento)	m³	2.284	R\$ 72,44	R\$ 165.423,43
Aterro e compactação (Brita c/ fornecimento)	m³	2.048	R\$ 92,23	R\$ 188.830,69
Geotêxtil	m²	18.900	R\$ 6,40	R\$ 121.035,60
Rebaixamento do NA	Unidade	Quantidade	Valor Unitário	Valor Total
Funcionamento da bomba	hora	2.774	R\$ 80,00	R\$ 221.953,36
Perfuração	m	1.260	R\$ 100,00	R\$ 126.000,00
Mobilização e transporte dos equipamentos	vb	1	R\$ 20.000,00	R\$ 20.000,00
Cravação dos geodrenos	Unidade	Quantidade	Valor Unitário	Valor Total
Fornecimento e cravação dos geodrenos MacDrain V	m	62.700	R\$ 6,20	R\$ 388.737,99
Mobilização e transporte dos equipamentos de cravação	vb	1	R\$ 170.000,00	R\$ 170.000,00
Aterro e compactação (Corpo do aterro)	Unidade	Quantidade	Valor Unitário	Valor Total
Aterro e compactação (Saibro c/ fornecimento)	m³	111.214	R\$ 33,45	R\$ 3.719.674,05
Remoção da sobrecarga	Unidade	Quantidade	Valor Unitário	Valor Total
Escavação e carga da sobrecarga;Transporte de material escavado;Disposição Final	m³	12.600	R\$ 23,65	R\$ 298.008,77
Valor Total			R\$	5.792.406,05

Tabela 4-7 – Orçamento para a alternativa (4) – aterro com sobrecarga temporária associada a geodrenos verticais.

A partir da definição das equipes de trabalho, foi possível determinar os prazos de execução dos serviços (Tabela 4-8) e elaborar um gráfico de Gantt (Tabela 4-9).

Aterro com geodrenos e sobrecarga temporária						
Aterro e compactação (Aterro de conquista) 100%PN	Unidade	Quantidade	Descrição da Equipe	Nº Equipes	Prazo (dias)	Prazo
Desmatamento	m²	8.190	1 trator; 4 serventes	1	3	29 h
Escavação e carga de solo mole;Transporte de material escavado;Disposição Final	m³	15.530	1 escavadeira; 10 caminhões; 2	2	11	97 h
Aterro e compactação (Areia c/ fornecimento)	m³	2.284	2 rolos lisos; 1 trator; 1 pipa; 1 motoniveladora; 10	2	2	19 h
Aterro e compactação (Brita c/ fornecimento)	m³	2.048	2 rolos lisos; 1 trator; 1 motoniveladora; 10 serventes	2	2	17 h
Geotêxtil	m²	18.900	5 serventes	3	7	63 h
Rebaixamento do NA	hora	3.055	-	-	-	-
Cravação dos geodrenos	Unidade	Quantidade	Descrição da Equipe	Nº Equipes	Prazo (dias)	Prazo
Fornecimento e cravação dos geodrenos MacDrain V	m	62.700	-	1	42	-
Mobilização e transporte dos equipamentos de cravação	vb	1	-	1	1	-
Aterro e compactação (Corpo do aterro)	Unidade	Quantidade	Descrição da Equipe	Nº Equipes	Prazo (dias)	Prazo
Aterro e compactação (Saibro c/ fornecimento)	m³	111.214	2 rolos pé-de-carneiro; 1 trator; 1 pipa; 1 motoniveladora; 1 trator pneus c/ grade;	3	34	297 h
Remoção da sobrecarga	Unidade	Quantidade	Descrição da Equipe	Nº Equipes	Prazo (dias)	Prazo
Escavação e carga da sobrecarga;Transporte de material escavado;Disposição Final	m³	12.600	1 escavadeira; 10 caminhões; 2 serventes	2	9	79 h

Tabela 4-8 – Prazos dos serviços para a alternativa (4) – aterro com sobrecarga temporária associada a geodrenos verticais.

Cabe ressaltar que o adensamento previsto para a camada de solo mole ocorre antes da retirada da sobrecarga (Tabela 4-9).

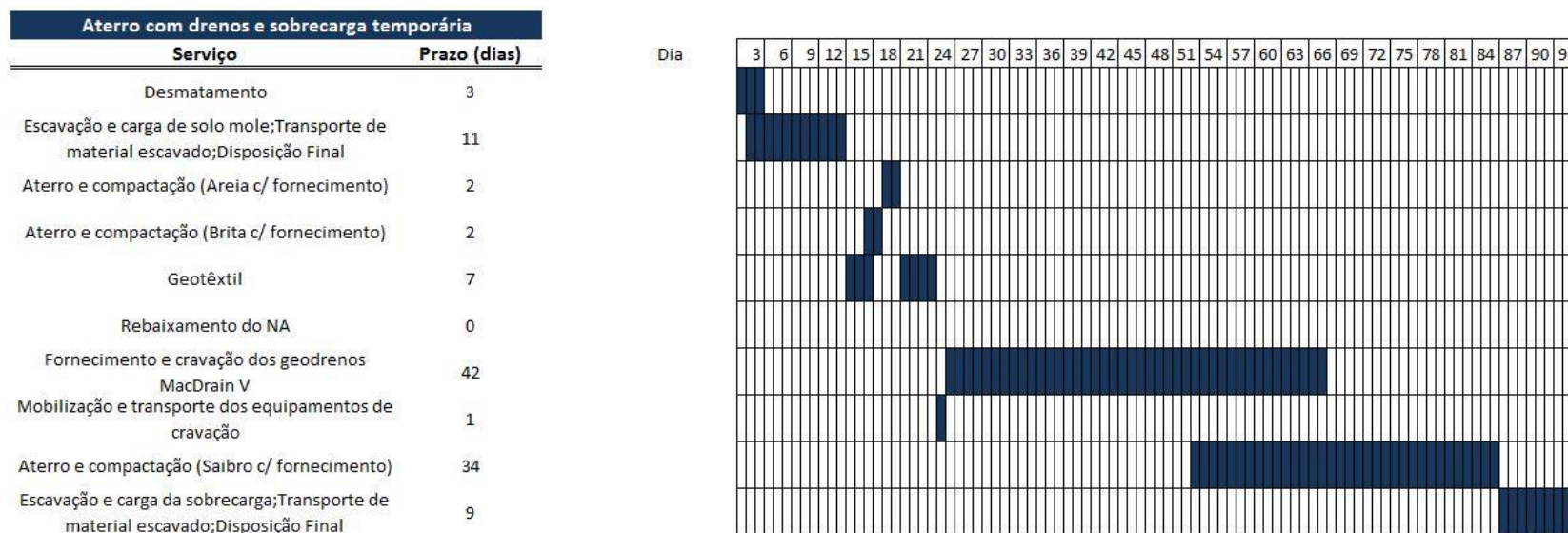


Tabela 4-9 – Prazo requerido para cada serviço e Gráfico de Gantt da alternativa (4) – aterro com sobrecarga temporária associada a geodrenos verticais.

O gráfico de Gantt possibilitou a elaboração do fluxo de saídas de caixa com a curva S e da análise de VPL (Figura 4-8).

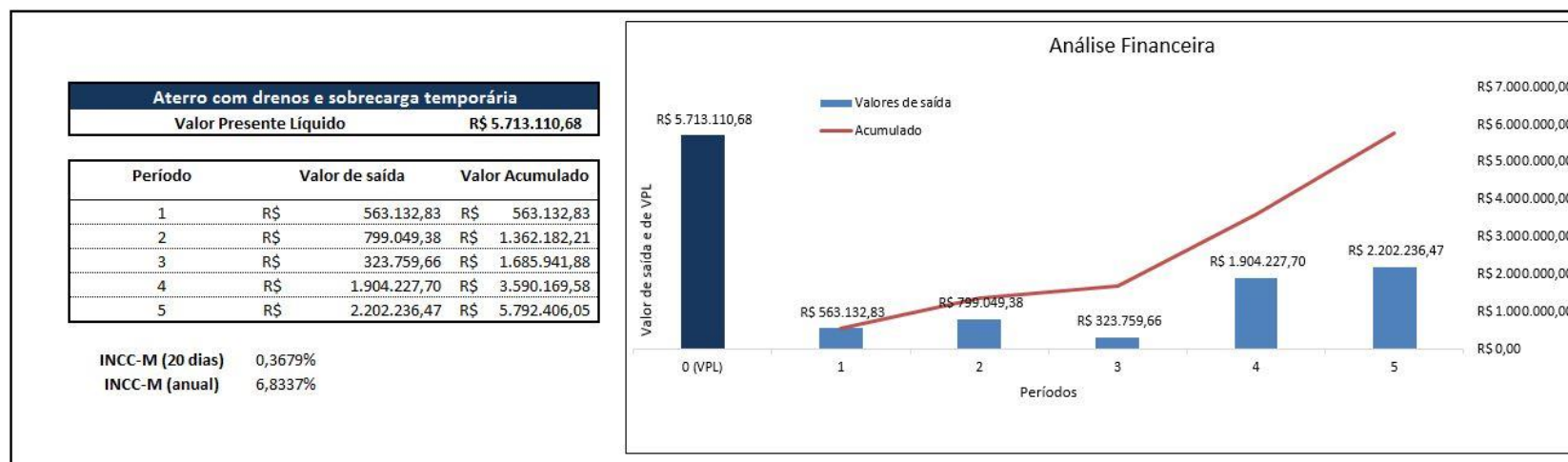


Figura 4-8 – Fluxo de caixa, VPL e Curva S para a alternativa (4) – aterro com sobrecarga temporária associada a geodrenos verticais.

Utilizando a análise de sensibilidade da ferramenta, estipulou-se, dessa vez, uma meta de 12 meses para o tempo de adensamento (novamente apenas para fins de exemplificação do recurso). O parâmetro escolhido para ser testado foi a altura da sobrecarga temporária (Figura 4-9). Portanto, podemos concluir a partir da Figura 4-9 que mesmo que fosse considerada uma sobrecarga temporária altíssima de 3,8 metros, a meta de 12 meses não seria alcançada. Para essa altura de sobrecarga temporária, o tempo de adensamento seria de 15 meses.

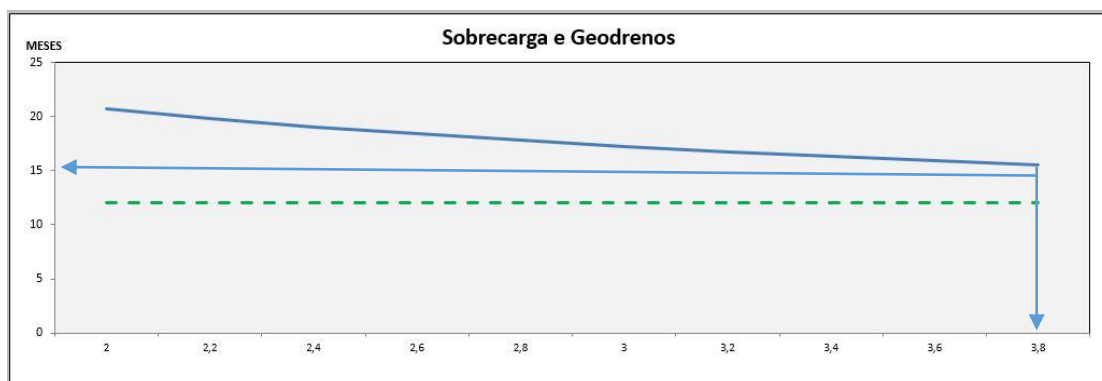


Figura 4-9 – Tempo de adensamento em função da altura de sobrecarga temporária com meta fixada em 12 meses.

Para a alternativa (4) – aterro com sobrecarga temporária associada a geodrenos verticais – foram obtidos os seguintes resultados: orçamento inicial de aproximadamente R\$ 5.792.406,05 e um prazo – somando o executivo e o de adensamento – de aproximadamente 1,9 ano. O VPL do projeto foi de R\$ 5.713.110,68 – mostrando novamente uma pequena importância dessa análise para a tomada de decisão. Isso significa que com um acréscimo de aproximadamente 20% no orçamento da solução com drenos, foi possível reduzir o prazo total em 46%.

4.2.6. Considerações finais

A Tabela 4-10 apresenta um resumo dos resultados obtidos nos itens anteriores, com o objetivo de facilitar o processo decisório. Portanto, com base nas premissas apresentadas nos itens 4.1, 4.2.1, 4.2.4 e 4.2.5, os resultados são:

Solução	Tempo de execução	Custo global	VPL
Aterro Convencional (1)	379,3 anos*	-	-
Sobrecarga Temporária (2)	189,8 anos*	-	-
Drenos Verticais (3)	3,5 anos	R\$ 4.813.315,80	R\$ 4.761.748,13
Drenos Verticais com Sobrecarga Temporária (4)	1,9 ano	R\$ 5.792.406,05	R\$ 5.713.110,68

Tabela 4-10 – Resumo dos resultados encontrados para as diferentes soluções adotadas. *Tempos de adensamento apenas.

O VPL da alternativa (3) – aterro com geodrenos verticais – mostrou-se 17% menor do que o da alternativa (4) – aterro com sobrecarga temporária associada a geodrenos verticais, sendo a solução mais vantajosa financeiramente. Contudo, apresenta um tempo de execução 84% maior. Contudo, é importante reforçar que não estão considerados os custos de manutenção e acompanhamento do aterro durante o processo de adensamento. Além disso, não foram considerados os benefícios indiretos de inaugurar essa obra de infraestrutura em região estratégica no Rio de Janeiro 1 ano e meio antes. Portanto, a solução com drenos verticais e sobrecarga temporária apresenta-se como a mais adequada nesse caso.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS, PRINCIPAIS CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A execução de aterros sobre solos moles demanda algum tipo de solução geotécnica que diminua ou elimine o tempo de recalque e garanta a estabilidade dos taludes do aterro. O presente trabalho analisou três soluções que têm como objetivo a diminuição do tempo de recalque por intermédio de uma ferramenta criada pelo autor para estimar, além do prazo, a magnitude dos recalques, considerando os métodos de cálculo existentes na literatura. Ressalta-se que tal ferramenta ainda não contempla o módulo de análise da estabilidade dos taludes do aterro, cujo desenvolvimento faz parte do plano de continuidade dessa pesquisa.

O desenvolvimento de ferramentas como a que foi criada neste trabalho possibilita a otimização da análise de viabilidade técnica de diversas alternativas possíveis para um mesmo empreendimento, ou uma etapa deste. Adicionalmente, tais ferramentas facilitam e agilizam a tomada de decisão ao serem incorporados aspectos relacionados à análise de viabilidade econômica das diversas opções.

Após sua validação, a ferramenta foi aplicada a um caso prático, o trecho rodoviário Ramo 300 situado na Barra da Tijuca, Rio de Janeiro, com o objetivo de avaliar opções à solução executada.

As opções estudadas foram:

- Aterro convencional;
- Aterro convencional com sobrecarga temporária;
- Aterro sobre drenos verticais;
- Aterro sobre drenos verticais associados a sobrecarga temporária.

Com base nos resultados obtidos, foram realizadas análises de viabilidade econômica das soluções consideradas viáveis tecnicamente (aquelas cujos prazos executivos foram considerados exíguos).

A análise de VPL se mostrou pouco útil, uma vez que o prazo executivo considerado é muito pequeno, portanto não há grande influência do tempo sobre o capital investido. E como as duas soluções mais aprofundadas – (3) aterro sobre drenos verticais e (4) aterro sobre

drenos verticais associados a sobrecarga temporária – têm procedimento executivo semelhante, a análise de fluxo de caixa é semelhante, diferindo basicamente apenas nos valores de saída, mas com pouca variação no tempo de execução (desconsiderando-se o adensamento).

Para uma camada tão espessa de solo mole, no caso, de 18 metros, e com os parâmetros considerados, a solução de aplicar apenas uma sobrecarga temporária mostrou-se tecnicamente inviável, posto que o prazo para estabilização do adensamento ultrapassava os 200 anos. Portanto, as soluções que consideram drenos verticais foram as escolhidas para analisadas segundo o critério econômico além do técnico.

A primeira opção de uso de drenos verticais sem a sobrecarga temporária apresentou os seguintes resultados:

- Custo: R\$ 4.813.315,80
- Prazo: 3,5 anos

A segunda opção, de sobrecarga temporária associada aos drenos, apresentou os seguintes resultados:

- Custo: R\$ 5.792.406,05
- Prazo: 1,9 ano

Conclui-se que, com um aumento de cerca de 20% no orçamento inicial, é obtido um ganho de aproximadamente 46% no prazo total de execução do empreendimento.

Conclui-se, portanto, que a solução com drenos verticais associados a uma sobrecarga temporária mostrou-se mais apropriada ao caso do Ramo 300 pelas razões supracitadas, resultando num de custo de R\$ 5.792.406,05 e tempo executivo (considerando a obra e o tempo de adensamento) de aproximadamente 1,9 ano.

Como recomendações para pesquisas futuras, pode-se citar:

- Realizar análise similar à executada no presente trabalho para outras soluções possíveis de obras sobre solos moles, como por exemplo aterro estaqueado;

- Complementar a ferramenta computacional com o módulo para realização de análise de estabilidade global dos taludes do aterro para uma verificação mais completa acerca da viabilidade técnica do projeto;
- Considerar o efeito do carregamento crescente com o tempo no cálculo do tempo de adensamento.
- Integrar os procedimentos de cálculo da análise econômica dentro da mesma ferramenta computacional da análise técnica.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, M. S. S., MARQUES, M. E. S., **Aterros Sobre Solos Moles: Projeto e Desempenho**, Oficina de Textos, São Paulo, 2010.

ARAUJO, L.O.C., Notas de Aula – Edificações, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2013

BARRON, R. A., **Consolidation of fine-grained soils by drain wells**, Journal of the soil mechanics and foundation division, ASCE, 1948.

FUNDAÇÃO GETÚLIO VARGAS, Índice Nacional de Custo da Construção. Disponível em: <http://www.portalbrasil.net/incc.htm>. Acesso em: 14 mar. 2016, 22:14:23.

LEROUEIL, S., **Notes de cours: comportement des massifs de sols**, Université Laval, Québec, Canadá, 1997.

LOUISE, R. B., **Contribuição ao Estudo dos Recalques por Adensamento Unidimensional**, Projeto de Graduação, UFRJ, Escola Politécnica, Curso de Engenharia Civil, Rio de Janeiro, 2011.

MARTINS, I.S.M., Palestra proferida no Clube de Engenharia, Rio de Janeiro, Brasil, 2005

MARTINS, I.S.M., ABREU, F.R.S., **Uma Solução Aproximada para o Adensamento Unidimensional com Grandes Deformações e Submersão de Aterros**, 2002

PINTO, C. S., **Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 aulas**, 3ª edição, Oficina de Textos, São Paulo, 2006.

SCO, **Sistema de Custos para Obras e Serviços de Engenharia**, Rio de Janeiro, 2014. Disponível em <http://www2.rio.rj.gov.br/sco/>. Acesso em: 12 fev. 2014, 13:12:48.

TAYLOR, D. W., **Fundamentals of Soil Mechanics**, John Wiley & Sons, New York, 1948.

TERZAGHI, K., FRÖLICH, O. K., **Theorie der Setzung von Tonschichten**, Viena: Franz Deuticke, 1936.