

AVALIAÇÃO DE ALTERNATIVAS DE PROCESSOS EXECUTIVOS DE ATERROS FERROVIÁRIOS SOBRE SOLOS MOLES

Custódio Moura Castro do Nascimento

Maria Esther Soares Marques

Instituto Militar de Engenharia

RESUMO

As mais importantes ferrovias brasileiras são usadas para exportação de minério, partindo das minas no interior do país até os portos litorâneos, onde o minério é embarcado para seus destinos. Nesse caminho, a via férrea freqüentemente atravessa depósitos espessos de argila mole em baixadas alagadas nos arredores de lagoas ou margens de rios. Os aterros construídos sobre essas áreas devem ser corretamente dimensionados para que os recalques da argila mole não prejudiquem a geometria e funcionalidade da via férrea. Há muitas técnicas de melhoramento de solo adequadas para a estabilização de aterros sobre solos moles, mas são em geral bastante onerosas e sua aplicação depende de um adequado plano de investigações geotécnicas, além de depender também dos prazos construtivos, das condições de contorno e custos. Este trabalho apresenta dados de ensaios geotécnicos em argilas moles de um trecho de uma ferrovia brasileira, com discussão de técnicas e prazos para algumas soluções possíveis para a duplicação da via nesse trecho.

ABSTRACT

The most important heavy haul lines in Brazil are used for ore exportation, carrying the products from inland to coastal harbors, where they are shipped to their final destiny. On this way, the railway has to cross thick compressive deposits of soft clays found on lowland saturated areas surrounding lagoons or at plain river borders. In order to maintain geometrical and functional design, the embankments built over these areas must be correctly designed to present adequate functional settlements and stability. There are many different ground improvement techniques which could be used to occupy lowland areas, however they are, in general, very expensive and its design demands high-quality geotechnical investigation. This paper presents regional geotechnical data and soil characteristics of an investigated site and the discussion about construction techniques commonly used in Brazil, illustrated through a case history of the duplication of a railway.

1. INTRODUÇÃO

As mais importantes ferrovias brasileiras são usadas para exportação de minério, partindo das minas no interior do país até os portos litorâneos, onde o minério é embarcado para seus destinos. Nesse caminho, a via férrea freqüentemente atravessa depósitos espessos de argila mole de origem flúvio-marinha em baixadas alagadas nos arredores de lagoas ou margens de rios.

A presença desses depósitos de argila mole de formação recente é uma constante em algumas regiões do Brasil, ressaltando-se as formações da Baixada Fluminense (Almeida *et al.*, 2005) e da Baixada Santista (Massad, 1999), bastante estudadas desde a década de 1970. Há, ainda, outras menos conhecidas no litoral do Paraná, Santa Catarina, Rio Grande do Sul, Bahia, Pernambuco e Sergipe. Além disso, a extensa rede hidrográfica brasileira, com rios de planície de grande porte, favorece a existência de inúmeros depósitos aluviais compressíveis também no interior do país (Oliveira, 2006).

O projeto de aterros ferroviários deve considerar que os recalques pós-construtivos devem ser minimizados, em função dos problemas que as deformações na via podem causar ao material rodante e à operação. Assim, deve-se ter atenção especial à escolha da melhor técnica executiva quando da implantação e duplicação de ferrovias em regiões de solos moles. Observa-se, portanto, a importância da avaliação das diversas alternativas construtivas para ferrovias em regiões de solos moles.

2. TÉCNICAS CONSTRUTIVAS SOBRE SOLOS MOLES

Para a construção sobre solos compressíveis, duas condições devem ser atendidas: garantia de estabilidade, para evitar o rompimento do aterro e das fundações, e avaliação das deformações, tanto verticais como horizontais, para garantir que se mantenham dentro de limites adequados, de acordo com as características da obra (Oliveira e Almeida, 2004).

2.1. Aterros sobre drenos verticais

Denomina-se aterro sobre drenos a técnica de cravação de drenos sintéticos verticais e posterior execução do aterro sobre o solo mole. Os drenos diminuem a distância de drenagem dentro da massa de solo compressível, o que dissipa as poropressões mais rapidamente, acelerando os recalques. Nesta técnica, a magnitude dos recalques finais previstos não é alterada, apenas sua evolução ao longo do tempo. Seu esquema típico é mostrado na figura 1, que também apresenta as bermas laterais utilizadas para aumentar a estabilidade.

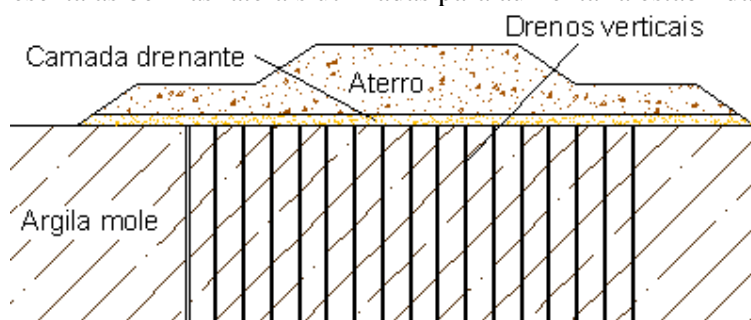


Figura 1: Esquema geral de um aterro sobre drenos.

Denomina-se sobrecarga ou pré-carregamento a espessura adicional de aterro que é aplicada temporariamente ao aterro propriamente dito, acima do greide de projeto. Passado o tempo necessário de atuação, ela é retirada. Sua função principal é acelerar os recalques, já que a presença de uma carga extra faz com que os recalques previstos inicialmente ocorram em um tempo menor. Outra função da sobrecarga é minimizar parte dos recalques secundários pós-construtivos, que ocorrem mais lentamente que os primários e são causados pelo ajustamento da estrutura interna da massa de solo, mesmo após a ocorrência de praticamente toda a dissipação das poropressões devido ao carregamento. A sobrecarga é comumente utilizada concomitantemente com os drenos verticais como método de aceleração dos recalques.

A principal vantagem do aterro sobre drenos é o seu baixo custo quando comparado a outras soluções com estacas, principalmente em se tratando de pequenas espessuras de solo mole. Entre as desvantagens, podem ser citadas a elevada magnitude de recalques pós-construtivos, que pode se tornar problemática para a operação da ferrovia, e o elevado prazo de execução do aterro, pois é necessário aguardar a estabilização dos recalques para o seu alteamento. No caso de duplicação de ferrovia, a avaliação da estabilidade global do conjunto deve ser verificada, bem como a possibilidade de ocorrência de recalques no trecho já existente.

2.2. Aterros sobre estacas com reforço de geogrelha

No aterro estruturado sobre estacas com reforço de geogrelhas utilizam-se capitéis para transferir a carga do aterro e do tráfego para as estacas e para camadas de solo com maior capacidade de carga, conforme mostrado na figura 2. As geogrelhas são utilizadas na base do aterro para redistribuir os esforços do aterro e tráfego para os capitéis e, conseqüentemente, para as estacas. Parte da carga vai para os capitéis, e parte dela para a geogrelha.

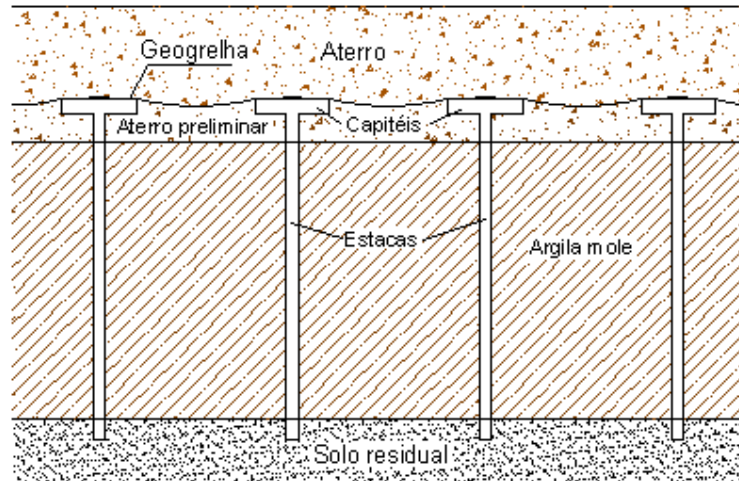


Figura 2: Esquema geral de um aterro sobre estacas com reforço de geogrelha.

A técnica apresenta como principal vantagem a significativa redução dos recalques construtivos quando comparados a obras de aterros convencionais ou sobre drenos verticais. Outro fator importante é a diminuição do tempo de execução do aterro, já que não há necessidade de aguardar a dissipação do excesso de poropressão e conseqüente mobilização da resistência na argila mole para o alteamento do aterro, podendo este ser feito em uma só etapa, já que não há preocupação com a instabilidade da argila mole.

A desvantagem seria a necessidade de se garantir que haja o efeito de arqueamento do aterro. Para tanto, a razão entre a espessura de aterro acima da geogrelha e o espaçamento entre faces de capitéis adjacentes deve ser superior ao limite de 0,7, recomendado por BS 8006 (BSI, 1995) e Sandroni (2006). Com isso, evita-se que ocorram as deformações no topo do aterro em função da deformação na geogrelha, conforme apresentado na figura 3, que podem conduzir a necessidade de manutenções periódicas da via. As outras desvantagens estão relacionadas aos custos dos equipamentos necessários à cravação das estacas e confecção dos capitéis, bem como ao custo da aquisição e instalação da geogrelha.

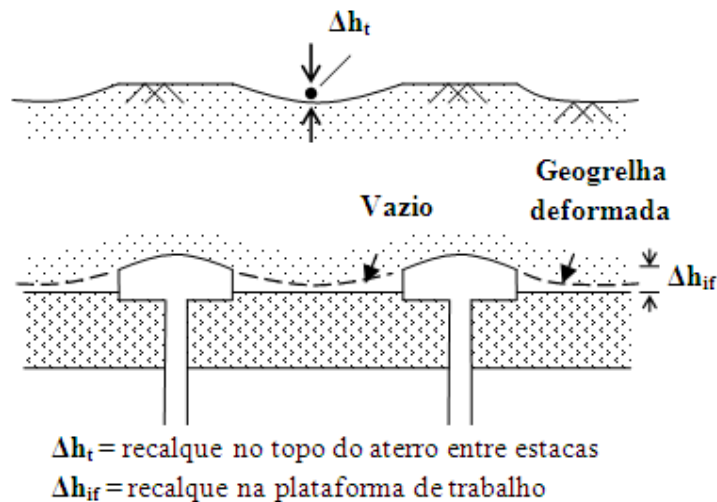


Figura 3: Recalque no topo da camada de aterro sobre estacas e com reforço de geogrelha (Almeida *et al.*, 2008).

Há grande aplicabilidade da técnica em aterros ferroviários, tanto em implantações de vias novas, quanto em duplicações de existentes, em função da minimização dos recalques pós-construtivos, que podem gerar instabilidade do material rodante em função das condições geométricas via. Spotti (2006) apresenta casos de sua utilização em ferrovias na Alemanha, Malásia e Brasil.

Foram realizados os seguintes estudos de campo: 40 sondagens à percussão (SPT), 14 ensaios de piezocone (associados a 25 ensaios de dissipação de poro pressões) e 33 ensaios de palheta (*vane test*). Foram retiradas e encaminhadas para laboratório 16 amostras tipo *Shelby*, de 4" de diâmetro, sobre as quais foram realizados: ensaios de caracterização e de determinação de limites de Atterberg em 16 amostras e 15 ensaios de adensamento. Ensaio de compressão simples foram realizados em 29 amostras. Os principais resultados desses estudos estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Características geotécnicas do depósito.

km	Prof. (m)	w ₀ (%)	γ_{nat} (kN/m ³)	e ₀	w _L (%)	w _P (%)	I _P (%)	C _c	c _v (m ² /s)	S _u (kPa)
18+740	3,0 a 3,5	73,9	14,4	2,27	47	24	23	1,17	-	18,4
18+740	5,0 a 5,5	40,3	17,1	1,2	34	15	19	0,41	-	11
18+800	2,0 a 2,5	95,3	14,4	3,03	89	35	54	1,49	-	17,5
18+800	4,0 a 4,5	104,4	13,9	2,99	83	31	52	1,34	-	5
19+000	2,0 a 2,5	99,5	13,6	2,68	73	27	46	1,28	8,00x10 ⁻⁹	9,1
19+000	3,0 a 3,5	72,2	15,3	2,16	54	25	29	0,72	7,40 x10 ⁻⁸	4,5
19+200	3,0 a 3,5	-	-	-	35	20	15	-	-	-
19+400	2,5 a 3,0	70,4	16,2	1,78	43	20	23	0,61	2,10 x10 ⁻⁷	10,7
19+800	2,5 a 3,0	33,6	16,8	1,19	-	-	-	0,29	2,90 x10 ⁻⁷	-
20+200	2,0 a 2,5	67,5	15,7	1,89	41	17	24	0,76	2,00 x10 ⁻⁷	11,4
20+800	2,5 a 3,0	125	14,2	3,41	92	31	61	1,45	1,10 x10 ⁻⁸	7,5
20+800	4,0 a 4,5	68,7	16	2,04	48	22	26	0,95	9,00 x10 ⁻⁸	-
21+600	2,0 a 2,5	108	13,3	3,23	77	30	47	1,47	-	11,3
21+600	4,0 a 4,5	51,9	15,8	1,63	36	21	15	0,5	-	-
22+000	2,0 a 2,5	123,3	13,6	3,46	91	31	60	0,22	-	-
22+000	3,0 a 3,5	78,7	15,2	2,32	58	24	34	0,98	-	10

w₀: umidade natural

e₀: índice de vazios

w_P: limite de plasticidade

C_c: coeficiente de compressão

S_u: resistência não-drenada

γ_{nat} : peso específico aparente natural

w_L: limite de liquidez

I_P: índice de plasticidade

c_v: coeficiente de adensamento vertical

3.1. Correlações entre parâmetros

O estudo das correlações existentes entre os parâmetros geotécnicos do solo é importante, entre outras coisas, para possibilitar a estimativa de um parâmetro de difícil obtenção em ensaio através de outro mais facilmente conseguido em campanhas de ensaios mais corriqueiros. A partir dos parâmetros geotécnicos de um depósito, podem-se obter relações que permitam, por exemplo, diminuir o número de amostras a serem coletadas ou avaliar a qualidade dos ensaios.

O coeficiente de compressão (C_c) é um parâmetro utilizado para a estimativa dos recalques. Sua obtenção é difícil, uma vez que é originado a partir do resultado do ensaio de adensamento que depende da estrutura do solo, muito suscetível a perturbações da amostra de solo mole indeformada coletada em campo. Tal ensaio requer cuidados especiais no processo

de amostragem e seus resultados são frequentemente afetados por amostras de má qualidade. Por outro lado, um parâmetro de fácil obtenção é a umidade natural do solo (w_0), obtida através do ensaio de umidade, que não é afetado por perturbações de amostragem, já que pode ser realizado com a amostra amolgada.

É possível a obtenção de uma correlação entre C_c e w_0 , para um dado depósito, uma vez que ambos os parâmetros são controlados pela composição e estrutura do solo, os quais, por sua vez, controlam tanto o índice de vazios (e_0) quanto a compressibilidade na faixa normalmente adensada (Terzaghi *et al.*, 1996). A partir dos dados da tabela 1, buscou-se uma correlação entre tais parâmetros, sendo apresentada na figura 4, muito similar ao encontrado por Nascimento (2009) para as argilas da zona oeste da cidade do Rio de Janeiro.

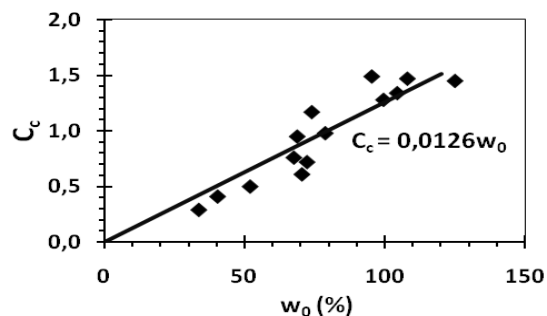


Figura 4: Curva de correlação entre C_c e w_0 para o depósito.

4. FORMULAÇÃO DO MODELO GOETÉCNICO

Os resultados dos ensaios em uma região podem ser mais ou menos dispersos, dependendo da homogeneidade ou heterogeneidade do depósito, sua origem, os agentes externos que atuaram durante sua formação, as tensões às quais ele foi submetido, entre outros fatores. Assim, após uma campanha de ensaios, é fundamental uma avaliação dos resultados, com comparação com dados regionais, e a adoção de valores de parâmetros de projeto, que serão adotados nos cálculos a serem realizados.

Denomina-se modelo geotécnico o conjunto de parâmetros e características geotécnicas que permitem avaliar com razoável precisão o comportamento de um determinado depósito de solo. O modelo será formulado através dos valores médios de projeto de cada um dos parâmetros importantes para a análise do recalque, da estabilidade e do prazo da construção de um aterro sobre o solo mole estudado.

4.1. Compressibilidade

As argilas moles, em virtude do seu elevado índice de vazios inicial *in situ* (e_0), são muito compressíveis. Quando submetidas a carregamentos superiores à sua tensão de sobreadensamento (maior tensão à qual já estiveram submetidas), apresentam recalques que devem ser adequadamente avaliados. A compressibilidade de uma argila mole é medida através do parâmetro $CR = C_c / (1 + e_0)$, que é diretamente proporcional aos valores de recalques primários e quanto mais elevado seu valor maiores serão também os recalques secundários. A figura 5 mostra o perfil de CR , bem como os valores adotados para projeto do trecho estudado, para cada faixa de profundidade. Os valores muito baixos foram descartados da média, por tratar-se de solos mais arenosos.

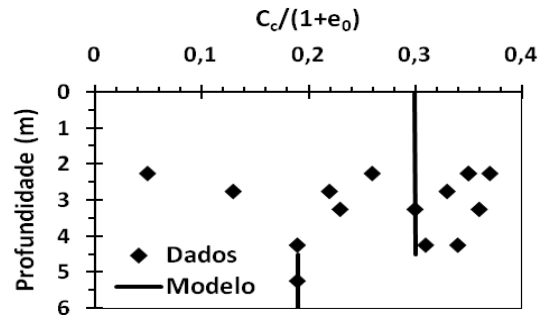


Figura 5: Perfil de compressibilidade do depósito.

4.2. Peso específico natural

Peso específico natural (γ_{nat}) é a razão entre o peso do solo e o seu volume, na umidade em que se encontra na natureza. A figura 6 apresenta o perfil do peso específico natural obtido nos ensaios realizados no trecho em estudo, bem como o valor adotado para o modelo a ser utilizado nas análises a serem realizadas.

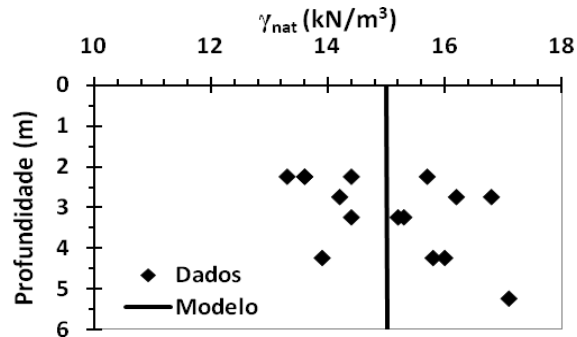


Figura 6: Perfil de peso específico natural do depósito.

4.3. Resistência não-drenada

A resistência não-drenada (S_u) de argilas saturadas é a resistência ao cisalhamento que o solo oferece quando é submetido a um carregamento sem que haja tempo de haver drenagem. Sua determinação é importante para a verificação da estabilidade de projetos de obras sobre argilas saturadas compressíveis, visto que a condição crítica ocorre durante a execução do aterro, quando não houve tempo para ocorrer a drenagem. A figura 7 mostra o perfil da resistência não-drenada obtido nos ensaios de palheta realizados no trecho em estudo, bem como o valor base adotado para o modelo.

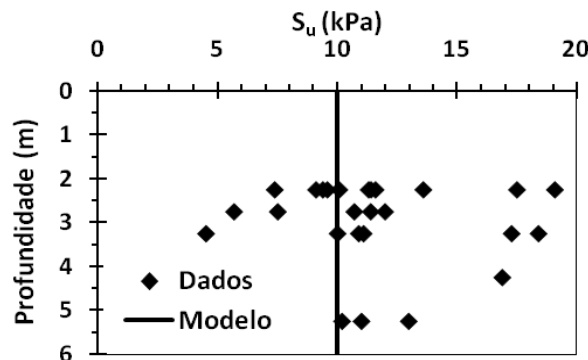


Figura 7: Perfil de resistência não-drenada do depósito.

4.4. Coeficiente de adensamento vertical

O coeficiente de adensamento vertical (c_v) é um parâmetro que permite uma estimativa da velocidade com a qual há a dissipação de poropressões no solo, ou seja, é diretamente associado ao tempo necessário para a estabilização dos recalques. É o parâmetro mais difícil de obter em ensaios de laboratório ou de campo, uma vez que seu valor é diretamente relacionado com a permeabilidade do solo, que, para depósitos sedimentares, varia em uma ampla faixa: de 10^{-8} a 10^{-7} cm/s. É comum, portanto, a obtenção de um perfil de c_v com larga faixa de valores. A figura 8 mostra o perfil do coeficiente de adensamento vertical, para faixa de tensões do trecho normalmente adensado, obtido a partir dos resultados de ensaios oedométricos realizados em amostras indeformadas e também os valores adotados no modelo.

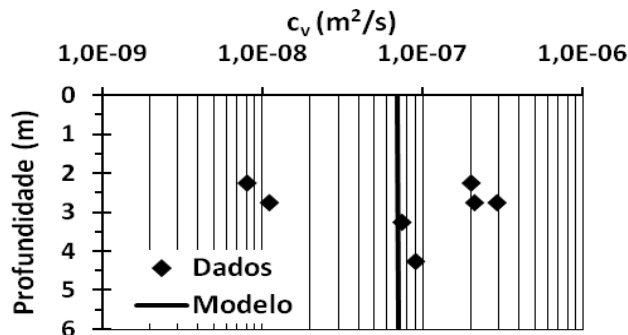


Figura 8: Perfil de coeficiente de adensamento vertical para o depósito.

5. ANÁLISE DO ATERRO SOBRE DRENOS VERTICAIS

A primeira alternativa construtiva analisada foi o aterro construído sobre drenos verticais. Essa alternativa consiste na cravação de geodrenos no solo a ser drenado, com posterior execução do aterro em etapas, espaçadas em um período de tempo que permita a dissipação do excesso de poropressão gerada pela construção do aterro e consequente ganho de resistência necessário para que o alteamento do aterro na etapa seguinte ocorra sem rupturas.

5.1. Previsão de recalques

Uma vez que o nível d'água do terreno é elevado, no cálculo dos recalques considerou-se a variação na tensão total devida à submersão do aterro, por ocasião dos recalques durante cada etapa. O recalque primário foi calculado em $\Delta H=1,89$ m para 9m de altura de aterro e 6m de espessura de solo compressível. O recalque secundário foi estimado em $\Delta H_{sec}=0,24$ m. Apesar de não haver registro de especificações das limitações de recalques pós-construtivos das ferrovias de carga brasileiras, os valores previstos para os recalques primário e secundário são elevados para operações ferroviárias, tornando-se necessária a estabilização dos recalques do aterro, diminuindo-se ao máximo os recalques pós-construtivos para minimizar as manutenções. Foi projetada uma sobrecarga de 3,5m para estabilizar 95% do recalque total (primário e secundário).

O aterro foi dimensionado para ser executado em 4 etapas, com um intervalo de tempo entre as etapas suficientemente grande para que ocorra dissipação de poropressões. Isso permitirá um ganho de resistência da argila mole, possibilitando o alteamento da próxima etapa do aterro sem que haja comprometimento do fator de segurança quanto a rupturas globais. O efeito dinâmico da carga de tráfego não foi considerado para o cálculo do recalque primário. A espessura de cada etapa e o seu recalque estão mostrados na tabela 2. Ao final do adensamento do solo mole, é prevista a remoção dos 3,5m de sobrecarga.

Tabela 2: Valores de carga e recalque para cada etapa.

Etapa	Espessura (m)	Recalque (m)	Cota final (m)
1	3,80	1,20	2,60
2	3,70	0,46	5,84
3	3,60	0,28	9,16
4	3,54	0,20	12,50
Remoção	-3,50	-	9,00

5.2. Prazo construtivo

Para cálculo do prazo construtivo, deve-se considerar o tempo para alteamento do aterro e o tempo necessário para dissipação das poropressões. O cálculo do tempo para dissipação das poropressões foi feito considerando drenagem combinada (vertical e radial). A drenagem é dupla, uma vez que o perfil geotécnico indica presença de areia sob a camada de argila. A drenagem radial será por drenos fibroquímicos verticais, considerados em malha triangular com espaçamento de 1,5m, diâmetro de contribuição $d_e=1,575\text{m}$ e diâmetro equivalente $d_w=0,0525\text{m}$. O tempo total de execução do aterro sobre drenos foi estimado em 19 meses.

5.3. Análise de estabilidade

O modelo adotado para a análise da estabilidade é mostrado na figura 9. Cabe ressaltar que a campanha de ensaios foi realizada a um afastamento de 15m a 60m da via existente, uma vez que a premissa do projeto básico era a da execução de duplicação com entrevia elevada. Tal condição foi adotada para evitar que os acréscimos de tensões gerados pela construção do aterro de duplicação acarretassem recalques na via existente, o que obrigaria a paralisação no tráfego para manutenções desta via.

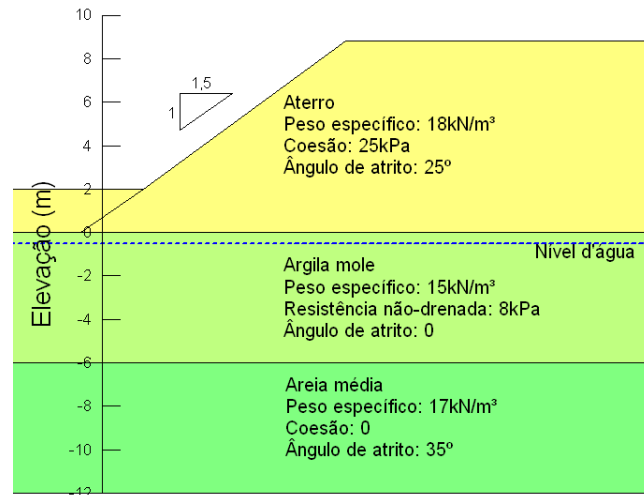


Figura 9: Modelo geotécnico utilizado nas análises de estabilidade.

A análise de estabilidade foi efetuada através dos métodos de Bishop Simplificado (equilíbrio de momentos), Janbu Simplificado (equilíbrio de forças) e Morgenstern-Price (equilíbrio de forças e momentos) (Abramson *et al.*, 1995). Foram consideradas superfícies de ruptura circulares, com pesquisas realizadas por software comercial, que apontou a superfície com fator de segurança (FS) mínimo. A figura 10 mostra a evolução do FS com o tempo, para cada etapa. Conclui-se a partir desta figura que, em nenhum momento o fator de segurança ficou abaixo do limite estabelecido, que foi de FS=1,3 para as etapas intermediárias e de FS=1,5 para a etapa final.

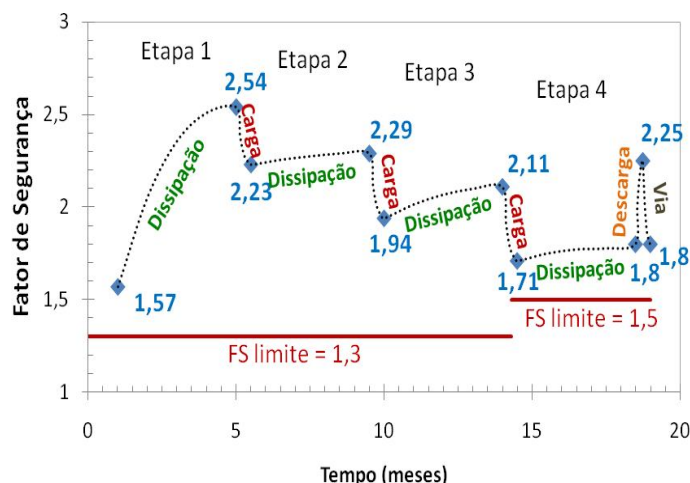


Figura 10: Evolução do fator de segurança do aterro com o tempo.

5.4. Custos construtivos

A previsão dos custos construtivos foi elaborada a partir de um orçamento aproximado para os principais serviços necessários à construção de 1km de aterro de uma ferrovia sobre drenos verticais, conforme tabela 3. Os custos dos materiais e serviços foram obtidos através de cotações com empresas brasileiras, em valores de fevereiro de 2008. Não foram considerados os custos de mobilização de equipamentos e instrumentação do aterro e nem BDI. Observa-se que os custos por km de implantação somente do aterro de uma via férrea sobre solos moles utilizando-se esta técnica são bastante elevados, quando se considera, a título de comparação, que os custos de implantação da linha da Via Ferronorte que foram da ordem de 1,0 a 1,3 milhões de dólares por km.

Tabela 3: Custos estimados para a construção de 1.000m de aterro ferroviário sobre drenos verticais, sobre solos moles – valores de fevereiro de 2008.

Serviços	Unidade	Quantidade	Valor unitário (R\$)	Valor do serviço (R\$)
Reforço com geotêxtil 30x30kN/m em 1 camada.	m ²	482.400	14,34	6.917.616,00
Colchão drenante de areia (aterro de conquista).	m ³	241.200	37,99	9.163.188,00
Instalação de drenos verticais pré-fabricados, em malha triangular de 1.5m de distância, inclusive fornecimento dos drenos.	m	763.334	5,70	4.351.004,00
Aterro com material de primeira categoria. DMT 4,0km. (Etapas 1 a 4)	m ³	2.756.916	12,27	33.827.359,32
Escavação, carga e transporte de material de primeira categoria, DMT 4km. (Remoção da sobrecarga)	m ³	204.797	10,28	2.105.309,73
Total estimado				56.364.477,06

6. ANÁLISE DO ATERRO SOBRE ESTACAS COM REFORÇO DE GEOGRELHA

A outra alternativa construtiva considerada foi a construção do aterro sobre estacas e com reforço de geogrelha. Trata-se de uma técnica que traz como principal vantagem a minimização dos recalques, uma vez que a carga do aterro não é transmitida ao solo mole, mas diretamente à camada de areia existente abaixo, através de estacas de concreto.

O aterro sobre estacas com reforço de geogrelha foi considerado com capitéis quadrados de 0,8m de lado e distância entre capitéis igual a 2,5m. O cálculo da eficiência da distribuição das cargas verticais mostra que o efeito de arqueamento dos solos é capaz de distribuir 67% da carga vertical para as estacas, enquanto 33% vai para a geogrelha, causando a solicitação e deformação da mesma. O resultado da análise do dimensionamento das estacas e da geogrelha mostra que a carga nas estacas é de 963kN, enquanto a tração atuante no reforço é igual a 251kN/m. Serão, portanto, consideradas estacas com carga de trabalho de 1000kN e reforço com 2 camadas de geogrelha de 150x150kN/m, considerando-se os fatores de segurança na utilização deste tipo de material.

O prazo construtivo considerado para a cravação das estacas, instalação da geogrelha e alteamento do aterro foi de 2,0 meses. Tal prazo depende de diversos fatores: disponibilidade de insumos no local da obra, produtividade dos serviços, clima (estação seca ou chuvosa). Por haver baixo carregamento da camada de argila, não há necessidade de se aguardar a dissipação das poropressões.

O impacto ambiental da alternativa construtiva se refere à necessidade de jazidas de empréstimo para o material do corpo do aterro. Como a técnica não necessita de bermas de equilíbrio ou sobrecarga e não envolve submersão do aterro, o impacto ambiental é menor do que no caso dos aterros sobre drenos.

Para o cálculo dos custos de construção, foram consideradas a aquisição dos materiais, cravação das estacas, execução dos capitéis, instalação da geogrelha e execução do corpo do aterro. A estimativa dos custos construtivos do aterro sobre estacas com reforço de geogrelha encontra-se na tabela 4. Observa-se que esta técnica apresenta custos cerca de 75% mais elevados que a de aterros sobre drenos para este estudo de caso.

Tabela 4: Custos estimados para a construção de 1.000m de aterro ferroviário com estacas e geogrelhas, sobre solos moles – valores de fevereiro de 2008.

Serviços	Unidade	Quantidade	Valor unitário (R\$)	Valor do serviço (R\$)
Reforço com geotêxtil 30x30kN/m em 1 camada.	m ²	201.000	14,34	2.882.340,00
Aterro de conquista	m ³	241.200	37,99	9.163.188,00
Cravação de estacas de concreto pré-moldadas, carga de trabalho 100tf, seção quadrada 30x30cm.	m	321.600	170,40	54.800.640,00
Capitéis de concreto 80x80x20cm.	m ³	4.116	300,00	1.234.944,00
Reforço com geogrelha 150x150kN/m, em 2 camadas.	m ²	402.000	46,50	18.693.000,00
Aterro com material de primeira categoria, DMT 4,0km. (Etapas 1 a 4)	m ³	956.760	12,27	11.739.445,20
Total estimado				98.513.557,20

7. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

O aterro sobre drenos verticais apresenta recalque primário estimado em 1,89m, valor este extremamente elevado em termos de operações ferroviárias, necessitando de ser estabilizado antes da via entrar em operação. O recalque secundário foi estimado em 0,24m, sendo também elevado, uma vez que exigiriam diversas intervenções na via para alteamento do greide e recompletamento do lastro. Embora não tenham sido encontradas especificações de recalques pós-construtivos limites para as ferrovias de carga brasileiras, pode ser utilizado

como parâmetro de comparação o valor exigido por uma ferrovia de alta velocidade na Malásia, onde os recalques pós-construtivos foram limitados a 0,025m (Raju *et al.*, 2004).

O prazo construtivo do aterro estaqueado é de cerca de 2 meses, dependendo do planejamento construtivo. No entanto, para um aterro sobre drenos verticais, o prazo para adensamento (dissipação das poropressões) de cada etapa é mais importante do que o prazo de construção da etapa propriamente dita, já que representa cerca de 85% do tempo total necessário para a estabilização do aterro. No caso estudado, o prazo construtivo do aterro sobre drenos foi de 19 meses, e não seria consideravelmente alterado com o emprego de mais equipamentos ou pessoal. O prazo seria diminuído caso houvesse alteração no espaçamento entre os drenos, entretanto a distância de 1,5m utilizada neste estudo já é considerada a distância mínima recomendada, para evitar perturbações no solo.

Quanto ao impacto ambiental, a alternativa sobre drenos necessita de mais aterro pois, além do corpo do aterro, há ainda as bermas, a perda por submersão e a sobrecarga que, apesar de ser temporária, tem de ser retirada e depositada em algum local, o que implica impactos ambientais quanto a empréstimos e bota-foras.

As estimativas de custos construtivos realizadas mostraram que 1 km de aterro sobre drenos custaria cerca de R\$ 56 milhões, enquanto o aterro sobre estacas custaria aproximadamente R\$ 98 milhões, com os prazos construtivos de 19 meses contra 2 meses, respectivamente. Estes valores dependem, entre outras coisas, da estratigrafia do depósito e do greide utilizado no projeto. Neste caso, caberia no estudo de viabilidade destas soluções a avaliação dos lucros associados à operação da ferrovia em função da diferença dos prazos construtivos em relação aos custos de implantação.

8. CONCLUSÕES

No projeto geométrico de uma ferrovia, devem-se evitar trechos a serem construídos sobre depósitos de argilas muito moles, pois a execução sobre este tipo de material está associada a elevados custos de implantação dos aterros. Quando isso não for possível, deve ser realizado amplo estudo geológico-geotécnico no depósito encontrado, com ensaios de laboratório e de campo, além do monitoramento do comportamento do aterro, para possibilitar a escolha da melhor técnica construtiva e permitir a avaliação do desempenho da construção.

As alternativas construtivas devem ser analisadas quanto à técnica (recalques construtivos e pós-construtivos), prazos construtivos, exigências ambientais quanto a movimentos de terra, e custos associados de construção e manutenção. Foram avaliadas duas alternativas de processos executivos de aterros de ferrovias sobre solos moles, considerando um determinado modelo geotécnico para o depósito: aterro sobre drenos verticais e aterro sobre estacas com reforço de geogrelha.

Com a análise, foi possível concluir que, para ferrovias, a alternativa do aterro sobre drenos somente será possível de ser implantada se a espessura e os parâmetros geotécnicos (umidade, coeficiente de compressão, índice de vazios, coeficiente de adensamento vertical, entre outros) da camada de argila mole forem tais que os recalques primários e secundários possam ser estabilizados em sua totalidade antes da ferrovia entrar em serviço. Caso contrário, a restrição técnica do recalque aponta o aterro sobre estacas com reforço de geogrelha como melhor solução, ainda que mais dispendiosa.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Vale S.A. por fornecer os resultados de ensaios necessários à execução deste estudo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abramson, L. W., Lee, T. S., Boyce, G. M., Sharma, S. S. (1995) *Slope stability and stabilization methods*, John Wiley and Sons, New York, 552 p.
- Almeida, M.S.S., Marques, M. E. S., Lacerda, W. A. & Futai, M. M. (2005) Investigação de campo e de laboratório na argila de Sarapuí, *Solos e Rochas*, vol. 28, no 1 , pp. 3 – 20.
- Almeida, M. S. S., Marques, M. E. S., Miranda, T. C. & Nascimento, C. M. C. (2008) Lowland reclamation in urban areas, *Proc. TC 41 Workshop Internacional de Infra-estrutura Urbana*, Búzios.
- BSI (1995) *BS 8006: Code of practice for strengthened / reinforced soils and other fills*. London.
- Massad, F. (1999) Planícies costeiras de Santos: implicações da história geológica no projeto de fundações. *Solos e Rochas*, 22(1), pp. 3 – 49.
- Nascimento, C. M. C. (2009) *Avaliação de alternativas de processos executivos de aterros de vias urbanas sobre solos moles*, dissertação de mestrado, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro.
- Oliveira, H. M. (2006) *Comportamento de aterros reforçados sobre solos moles levados à ruptura*, tese de doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.
- Oliveira, H. M. & Almeida, M. S. S. (2004) Aplicações em adensamento de solos compressíveis. In: *Manual Brasileiro de Geossintéticos*, ed. Vertemati, J. C. Ed. Edgard Blücher, São Paulo, pp. 275-294.
- Raju, V.R., Hari Krishna, R., Wegner, R. (2004) Ground improvement using vibro replacement in Asia 1994 to 2004 - a 10 year review, *Proc. of the 5th International Conference on Ground Improvement Techniques*, Kuala Lumpur, Malaysia. CDRom Keller Publications.
- Sandroni, S. S. (2006) Sobre a prática brasileira de projetos geotécnicos de aterros rodoviários em terrenos com solos muito moles. *XIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica*, Curitiba, em CD.
- Spotti, A. P. 2006. *Aterro estaqueado reforçado instrumentado sobre solo mole*. Tese de doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.
- Terzaghi, K., Peck, R. B. & Mesri, G. (1996) *Soil mechanics in engineering practice*, John Wiley & Sons Inc., 3rd Ed., New York.

Custódio Moura Castro do Nascimento (custnascimento@yahoo.com.br)

Maria Esther Soares Marques (esther@ime.eb.br)

Departamento de Engenharia de Fortificação e Construção, Instituto Militar de Engenharia

Praça General Tibúrcio, 80, Urca – Rio de Janeiro, RJ, Brasil.