

REFORÇO DE UM ATERRO PARA IMPLANTAÇÃO DE UMA RODOVIA SOBRE SOLOS MOLES COM UTILIZAÇÃO DE GEOSINTÉTICO

Emily Lipreri Paludo^a, Fernando Eduardo Boff^{fi*}

a) FSG Centro Universitário

| Informações de Submissão | Resumo |
|---|--|
| <p>*Mestre Fernando Eduardo Boff, endereço: Rua Os Dezoito do Forte, 2366 - Caxias do Sul - RS - CEP: 95020-472</p> | <p>O solo como parte de uma camada de pavimento, passa a apresentar características construtivas, porém, é comum os solos de obras rodoviárias muitas vezes apresentarem baixa capacidade de suporte de carga. Para viabilizar a implantação de uma rodovia nessas situações, técnicas de melhoramento e/ou reforço do solo devem ser executadas para que a capacidade de carga do solo seja elevada e minimize os efeitos de recalque. Ao planejar a construção de um aterro sobre solo mole há algumas alternativas, seja ela evitar o problema removendo a camada mole ou construindo o aterro sobre esta camada. Desta forma faz-se necessário a caracterização e análise do solo escolhido, o dimensionamento do projeto de reforço com geossintético além do controle tecnológico rigoroso de cada fase do processo.</p> |
| <p>Palavras-chave: Solos moles; geossintético; pavimentação</p> | |

1 INTRODUÇÃO

A vasta ocupação do território brasileiro e a necessidade constante de implantação de novas rodovias se depara com problemas decorrentes da presença de solos moles ou do comportamento geotécnico apresentado pelos diferentes tipos de solos. Engenheiros e técnicos do assunto procuram evitar terrenos de formação argilosa mole e compressíveis como solo de fundação, optando por outra localização ou removendo a camada de solo mole quando esta ação é técnica e economicamente viável. Na impossibilidade da remoção do solo mole, o solo em estudo deve ser reforçado ou deve ser aplicada técnicas para controle dos recalques, porém, o processo de reforço do solo pode causar imprevistos na sua execução tornando-o mais longo e oneroso, como

rupturas inesperadas, deformações excessivas, movimentações não previstas e a necessidade de se construir o aterro em etapas.

Sabendo da importância técnica e econômica da implantação de uma rodovia sobre um aterro de solo mole, este trabalho busca verificar a resistência de um pavimento a partir do dimensionamento do mesmo sobre um solo mole reforçado com material geossintético. Com base em dados de investigações geotécnicas e instrumentação de campo e laboratório disponibilizados pelo manual técnico da empresa Maccaferri, objetiva-se avaliar o desempenho deste aterro e entender o comportamento do solo nestas situações.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

A caracterização do solo por meio de ensaios de laboratório e de campo é imprescindível para a eficaz elaboração do projeto de reforço e consequente execução da obra sem grandes imprevistos.

2.1 Caracterização do solo

O solo, conforme a ABNT NBR 6502, é o material proveniente da decomposição das rochas pela ação de agentes físicos ou químicos, podendo ou não ter matéria orgânica. É definido também como o produto da decomposição e desintegração da rocha pela ação contínua do intemperismo. Por meio destes processos, os solos moles são formados.

Conforme Massad (2010, p. 114):

Entende-se por solos moles os solos sedimentares com baixa resistência à penetração (valores de SPT não superiores a 4 golpes), em que a fração argila imprime as características de solo coesivo e compreensível. São, em geral, argilas moles ou areias argilosas fofas, de deposição recente, isto é, formadas durante o Quaternário.

Para a implantação de uma rodovia, o solo como parte de uma camada de pavimento, passa a apresentar características construtivas, fazendo-se necessário a caracterização e análise do solo escolhido para esta atividade, bem como o controle tecnológico rigoroso, seja, em laboratório ou em campo.

2.1.1 Caracterização de solos argilosos moles

De acordo com Massad (2003), os solos argilosos podem ser de origem marinha ou fluvial, sendo que ambos ocorrem constantemente nas planícies costeiras do Brasil. Para Oliveira (2006), a ocupação do território brasileiro se concentrou principalmente nas regiões litorâneas, entre a Serra do Mar, Serra Geral e o Oceano Atlântico, nesses locais ocorreram depósitos marinhos e aluviais de argilas moles de formação recente, que por sua vez, acabam se espalhando por todo o país.

Conforme Massad (2003), os solos moles de origem fluvial são formados por deposições de sedimentos nas planícies de inundação dos rios que, ao entrarem em um período de cheia, ocupam vastas áreas e depositam material nas regiões mais baixas, pouco drenadas, formando solos finos e jovens. Em relação à solos moles de origem marinha, Massad (2013) afirma que ocorrem pelo ingresso e regresso do mar ao longo do tempo. As formações marinhas mais recentes, cerca de 7.000 a 5.000 anos, surgiram a partir do alagamento do continente pelo mar e formação de baías e lagunas preenchidas de sedimentos finos e moles. As argilas moles também se caracterizam por apresentar valores altos de umidade (w), elevados valores de limite de plasticidade (LP) e também elevados limites de liquidez (LL).

2.2 Investigações geotécnicas

Conforme Almeida e Marques (2010), a programação das investigações geotécnicas e sua realização compõem a primeira etapa do projeto de uma obra geotécnica, conforme figura 01.

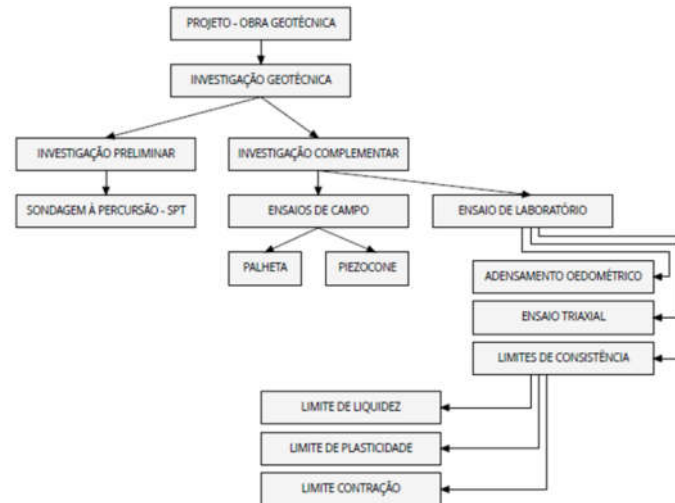


Figura 01: Fluxograma de investigação geotécnica
 Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

A partir do reconhecimento do terreno por meio de mapas geológicos, fotografias e levantamento de dados, as investigações são programadas em duas etapas:

- a) investigação preliminar: utilizada para determinar a estratigrafia da área de estudo com sondagens a percussão;
- b) investigação complementar: ensaios de campo e laboratório que buscam definir os parâmetros geotécnicos para auxiliar nos cálculos de estabilidade e recalques. Também podem ser utilizados para aperfeiçoar a estratigrafia do local.

2.2.1 Sondagem à percussão

Normatizada pela ABNT NBR 6484, o ensaio de Standard Penetration Test (SPT) tem por objetivo a definição dos tipos de solos, das espessuras das camadas e dos perfis geológico-geotécnicos através do material amostrado pelo equipamento e medir a resistência do solo por um valor conhecido como N_{spt} , que é o número de golpes necessários para penetração de 30 cm do amostrador. A tabela 01 traduz os valores da resistência de solos moles quanto ao ensaio de SPT.

Tabela 01: Índices de resistência à penetração de argilas e siltes argilosos

| SOLO | ÍNDICE DE RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO (N) | DESIGNAÇÃO |
|-------------------------------|--|------------|
| ARGILAS E SILTES ARGILOSOS | ≤ 2 | Muito mole |
| | 3 a 5 | Mole |
| | 6 a 10 | Média (o) |
| | 11 a 19 | Rija (o) |
| | > 19 | Dura (o) |

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 6484 (2001).

De acordo com Almeida e Marques (2010), em solos moles, o número de golpes para penetração dos 30 cm finais do amostrador no solo é igual a zero. Conforme Schnaid e Odebrecht (2012), o ensaio de SPT é mundialmente conhecido como o método mais comum e barato para sua função, entretanto, não é uma técnica apropriada para a determinação da resistência destes materiais.

2.2.2 Ensaio de campo

De acordo com Almeida e Marques (2010), os ensaios de campo mais utilizados são os de palheta e de piezocone.

2.2.3 Ensaio de laboratório

De acordo com Almeida e Marques (2010), os ensaios de laboratório são os de caracterização completa do solo. Essa caracterização inclui a análise granulométrica por peneiramento e sedimentação, a determinação dos limites de liquidez e plasticidade e a determinação da massa específica dos grãos necessária para os ensaios de sedimentação e adensamento.

2.3 Melhoramento de solos moles

Com a presença de solo mole, materiais compressíveis como argilas moles ou areias argilosas fofas, faz-se necessário a utilização de técnicas de melhoramento do solo para viabilizar obras sobre estas áreas instáveis para que a capacidade de carga do solo seja elevada e minimize os efeitos de recalque absoluto (Nakamura, 2013).

Fatores como, tipo e condições do solo, nível de tolerância dos recalques, grau de melhoramento almejado, custo previsto e prazo de execução, além de espaço e equipamentos disponíveis para a execução dos serviços são imprescindíveis para a escolha da técnica de melhoramento do solo (Nakamura, 2013). A substituição do solo instável por outro mais resistente é possível, entretanto, deve haver uma avaliação técnica-econômica afim de verificar o espaço para o armazenamento da terra retirada, o transporte dos materiais e a disponibilidade de solo adequado nas proximidades.

2.3.1 Métodos de melhoramento de solos moles

Almeida (1996), afirma que ao planejar a construção de um aterro sobre solo mole a primeira alternativa consiste em evitar o problema removendo a camada mole se a espessura da mesma for inferior a 4 m, não sendo esta alternativa viável, constrói-se o aterro sobre a camada mole. O aterro pode ser construído em seção trapezoidal simples ou com bermas laterais para aumentar o fator de segurança.

De acordo com Almeida (1996), adaptado de Magnan (1994), dentre as técnicas utilizadas para aceleração ou diminuição de recalques de aterros sobre solos moles, destacam-se:

- a)pré-carregamento: a vantagem do pré-carregamento é a obtenção eficaz de um greide final livre de recalques, enquanto a desvantagem é o tempo necessário para esta obtenção;
- b)pré-carregamento com drenos verticais: como vantagem, essa técnica acelera a ocorrência dos recalques, por outro lado, tem como desvantagem menor tempo necessário;
- c)substituição da argila: como vantagem, a substituição da argila se torna mais econômica diante da possibilidade de remoção do solo, de modo que se faz necessário haver um local para disposição do solo extraído, transformando essa necessidade em desvantagem;
- d)aterro com materiais leves: apresenta baixa confiabilidade, dado que os recalques desejados são pequenos, além de ser um processo oneroso;
- e)aterros estaqueados: é um dos métodos de reforço disponíveis, não apresenta desvantagens, apresenta boa confiabilidade, além de ser um processo rápido, porém oneroso.

2.4 Reforço de solos

A introdução de elementos resistentes à tração aumenta a resistência e diminui a deformabilidade do maciço por meio da transferência de esforços para os elementos resistentes, melhorando assim, o comportamento global do maciço. Em geral, os solos possuem elevada resistência à esforços de compressão, entretanto baixa resistência à esforços de tração (SAYÃO; SIEIRA; SANTOS, 2013, p. 145). A figura 02 demonstra o comportamento de um solo reforçado.

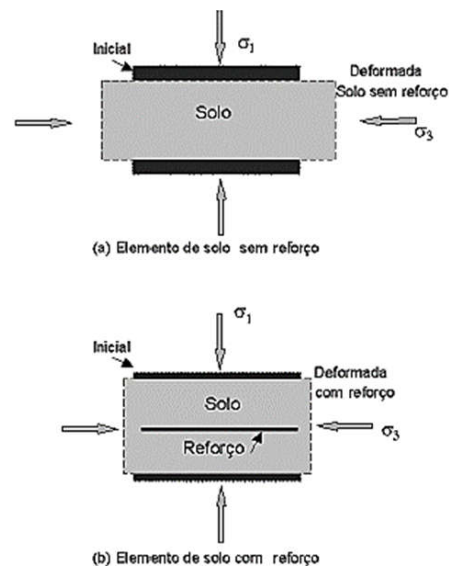


Figura 02: Comportamento de um solo reforçado
Fonte: Manual técnico Maccaferri (2013, p. 145)

Uma massa de solo carregada verticalmente sofre deformações verticais de compressão e deformações laterais de extensão (tração), porém, se a mesma estiver reforçada, os movimentos laterais são restritos.

2.4.1 Reforço de solos com geossintéticos

Conforme Sayão, Sieira e Santos (2013, p. 127), os geotêxteis são produtos têxteis de fibras sintéticas, identificados como mantas permeáveis, flexíveis e pouco espessas. Possuem uma vasta área de aplicação por se adequarem à maioria das funções dos geossintéticos, tais como reforço, drenagem, filtragem e separação. Em função do

arranjo estrutural de suas fibras ou filamentos, os geotêxteis podem ser classificados como tecidos, não tecidos ou tricotados.

De acordo com Sayão, Sieira e Santos (2013, p. 130), as geogrelhas são geossintéticos formados por uma rede regular de elementos integralmente conectados com abertura superior a 6,35 mm (1/4 de polegada) a fim de permitir o imbricamento com o solo envolvente. Utilizadas como reforço de estruturas de pavimento, são malhas vazadas, que permitem a maior interação e ancoragem com o meio devido a sua comunicação com o solo. Quanto a sua fabricação, geralmente é utilizado o polietileno de alta densidade, o poliéster e o polipropileno. São classificadas como rígidas e flexíveis.

Baseado em estudos realizados sobre aterros reforçados, este método melhora a distribuição das tensões aplicadas pelo aterro sobre o solo de fundação, minimiza os recalques diferenciais, reduz os deslocamentos horizontais e o tempo de execução, aumenta o fator de segurança do conjunto e a vida útil da obra (PERBONI, 2003).

Os geotêxteis ou geogrelhas são elementos bidimensionais, diferenciados pelos mecanismos de interação solo-reforço. A interação no caso dos geotêxteis é resultante do atrito gerado na interface entre o solo e a superfície do reforço. Já no caso das geogrelhas, os mecanismos responsáveis pela condição estabilizadora do aterro reforçado são resultantes do atrito e da resistência passiva ou da ancoragem (PERBONI, 2003).

2.5 Aterros sobre solos moles

De acordo com Sayão, Sieira e Santos (2013, p. 159) o emprego de geossintéticos como elemento principal de reforço de base de aterro sobre solo mole possibilita a construção de taludes mais íngremes além de agilizar o processo construtivo.

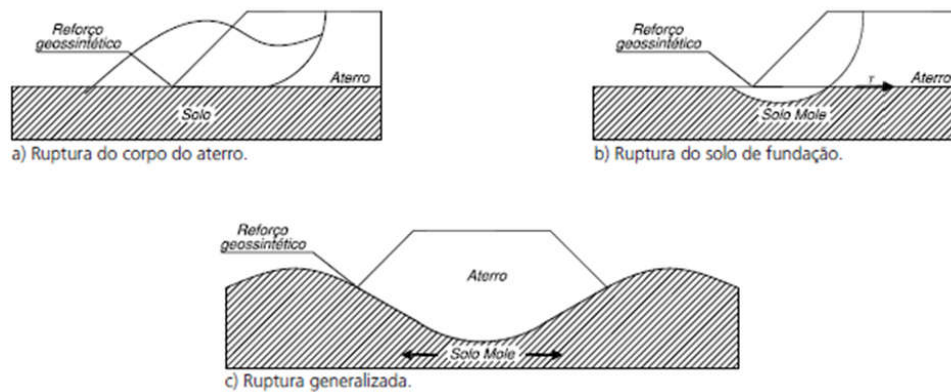


Figura 03: Tipos de ruptura de um aterro sobre solo mole
 Fonte: Manual técnico Maccaferri (2013, p. 159)

Ao dimensionar o reforço, a obra é analisada de forma a considerar que a superfície de deslizamento seja circular e emprega-se o método de equilíbrio limite. São verificados a ruptura do corpo do aterro ao longo do contato com o geossintético, conforme figura (03.a), a ruptura do solo de fundação, conforme figura (03.b) e a ruptura generalizada, conforme figura (03.c).

2.6 Reforço de base de pavimento

Solos de obras rodoviárias que possuem subleito com materiais que apresentam valores de CBR (California Bearing Ratio) baixos estão sujeitos à problemas na execução e funcionamento estrutural do pavimento (SAYÃO; SIEIRA; SANTOS, 2013, p. 161).

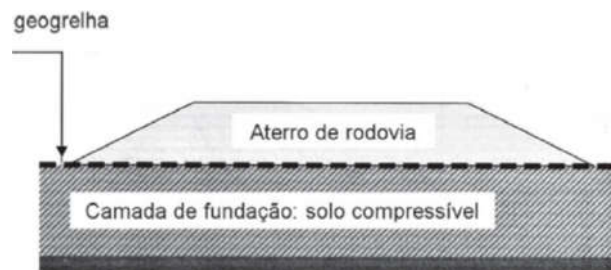


Figura 04: Reforço do solo com geogrelha
 Fonte: Adaptado pelo autor (2018).

Além de absorver parte dos efeitos mecânicos do tráfego, a utilização de materiais geossintéticos, conforme figura 04, como elementos de reforço na base dos pavimentos pode evitar deformações provenientes do subleito no pavimento, reduzir a

possibilidade de aparecimento de trincas por fadiga, reduzir a camada granular e proporcionar conforto e segurança ao usuário da via (MACCAFERRI, p. 22, 2009).

3 METODOLOGIA

De acordo com Senço (2008), pavimento é a estrutura construída sobre a terraplanagem e destinada, técnica e economicamente, a resistir aos esforços verticais oriundos do tráfego e distribuí-los, melhorar as condições de rolamento quanto ao conforto e segurança e resistir aos esforços horizontais (desgaste), tornando mais durável a superfície de rolamento.

Conforme a figura 05, pavimento é o conjunto das várias camadas com finita espessura acomodadas sobre um local exercendo papel de fundação da estrutura, designado subleito.



Figura 05: Seção transversal típica de um pavimento flexível
Fonte: Adaptada pelo autor (2018).

Um pavimento flexível é constituído pelas camadas do subleito, regularização ou reforço deste subleito, a base e sub-base e por fim o revestimento do pavimento.

3.1 Metodologia de cálculo

A metodologia de cálculo escolhida para este estudo é baseada na teoria utilizada para o reforço de estruturas não pavimentadas sobre solos de subleito coesivos, definida por Giroud e Noiray (1981). O processo construtivo apresenta condições

similares de esforço e deformação no subleito e nas camadas granulares às vias não pavimentadas.

O solo da base ou sub-base é considerado incompressível, as deformações produzidas logo abaixo das rodas causam o levantamento do solo entre e ao lado das mesmas, conforme figura 06. Ao dispor um reforço geossintético nesse solo, as deformações produzidas são transmitidas ao reforço, que se converte a uma forma similar de onda, com o conseqüente aparecimento de uma tensão de tração sobre o referido reforço (MACCAFERRI, p. 23, 2009).

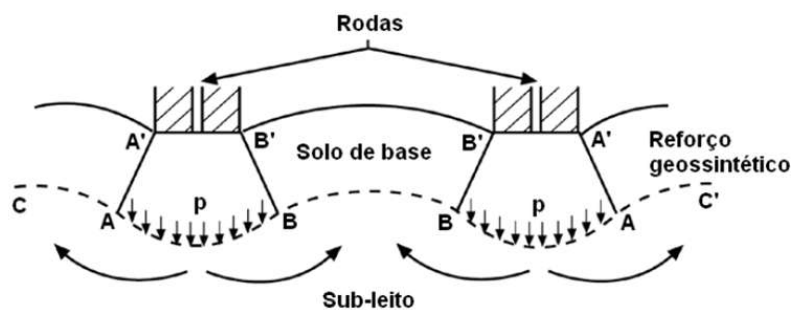


Figura 06: Dinâmica das estradas reforçadas com geossintéticos
Fonte: Manual técnico Maccaferri (2009, p. 23)

Em situações em que um material flexível apresenta a forma de onda, a pressão na superfície côncava é maior que a pressão na superfície convexa, conhecido como efeito membrana. Entre as rodas (BB) e nos lados das rodas (AC), a pressão aplicada pelo reforço sobre o subleito é maior que a pressão aplicada pela camada granular sobre o reforço (MACCAFERRI, p. 23, 2009).

Sob as rodas (AB), a pressão aplicada pelo reforço sobre o subleito é menor que a pressão aplicada pelas rodas mais a camada de material granular sobre o reforço. O reforço geossintético possibilita o confinamento horizontal do subleito dos lados interno e externo das rodas, além de diminuir a pressão exercida pelas rodas no subleito (MACCAFERRI, p. 23, 2009).

3.2 Dados necessários para os cálculos de dimensionamento da rodovia

Projeto de uma via pavimentada sobre solo mole com vida útil de 20 anos:

- $S_u = 30.000 \text{ N/m}^2$ (Resistência não drenada);
- $P = 80.000 \text{ N}$ (Carga máxima de eixo);

- c) $r = 0,075$ m (Profundidade de afundamento, aceitável entre 0.075 a 0.15 (m));
 d) $N = 1.000$ (Número de passadas de eixo padrão por dia em um ano);
 e) $P_c = 480.000$ N/m² (Pressão do Pneu);
 f) $\beta = 26,6$ (Ângulo de distribuição de tensões);
 g) $e = 1,90$ m (Distância entre rodas).

O dimensionamento de uma rodovia é dividido em duas etapas, a primeira etapa consiste no projeto da estrada não pavimentada, ou seja, é fase construtiva e a segunda etapa se refere a averiguação da estabilidade da camada granular e da camada de sub-base para a vida útil estipulada para o pavimento. O reforço geossintético do estudo é o MacGrid® WG 40.

3.3 Cálculos do dimensionamento da rodovia não pavimentada

1º Cálculo da espessura granular para o caso dinâmico sem reforço

$$h'_o = \frac{125,70 \log N + 496,52 \log P - 294,14r - 2412,42}{Su^{0,63}} = 0,57$$

2º Cálculo da espessura granular para o caso quase-estático sem reforço considerando um tráfego pesado

$$B = \sqrt{\frac{P \cdot \sqrt{2}}{P_c}} = 0,48 \text{ m} \quad L = \sqrt{\frac{P}{2P_c \cdot \sqrt{2}}} = 0,24 \text{ m}$$

Utilizando a primeira equação é possível calcular o valor de h_o

$$Su = \frac{P}{2\pi (B + 2h_o \tan \alpha_o)(L + 2h_o \tan \alpha_o)} = 0,31$$

3º Cálculo da espessura granular para o caso quase-estático com reforço

Adotando-se um valor inicial para h' , é possível determinar a espessura da camada granular para o caso quase-estático com reforço.

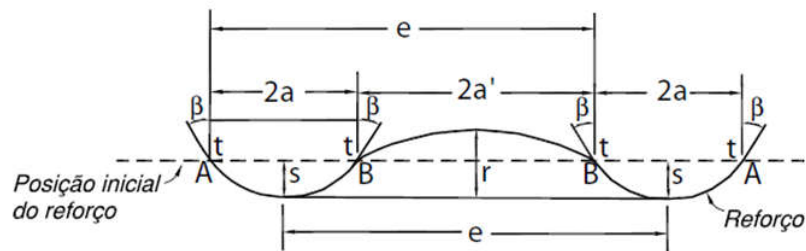


Figura 07: Analogia geométrica para deformação no reforço geossintético
Fonte: Manual técnico Maccaferri (2009, p. 25)

De acordo com a figura 07 é possível determinar as equações para a , a' e s

$$a = \frac{B + 2 \cdot h' \cdot \tan(\beta)}{2} = 0,24 \text{ m}$$

$$a' = \frac{e - B - 2 \cdot h' \cdot \tan(\beta)}{2} = 0,75 \text{ m}$$

Se $a' > a$:
$$s = \frac{r \cdot a'}{2a}$$

$$s = 0,11$$

Se $a' < a$:
$$s = \frac{2 \cdot r \cdot a^2}{2 \cdot a^2 + 3 \cdot a' \cdot a + a'^2}$$

A partir do gráfico da figura 08 de tensão por alongamento para a geogrelha MacGrid® WG, é possível obter os valores para o módulo de rigidez de um específico alongamento.

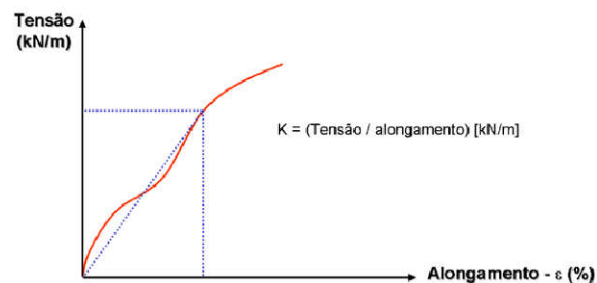


Figura 08: Gráfico de tensão por alongamento para a geogrelha MacGrid® WG

Fonte: Manual técnico Maccaferri (2009, p. 31)

Com a posse desses valores é possível calcular o valor de h' pela equação:

$$(\pi + 2)Su = \frac{P}{2(B + 2 \cdot h \cdot \tan \alpha)(L + 2 \cdot h \cdot \tan \alpha)} - \frac{K \cdot \varepsilon}{a \sqrt{1 + \left(\frac{a}{2s}\right)^2}}$$

4º Redução da espessura da camada granular considerando reforço geossintético

$$\Delta h = h_0 - h' = 0,22$$

5º Determinação da espessura da camada granular reforçada com geossintético

$$Hr = h_0' - \Delta h = 0,35$$

Após obter a espessura para a sub-base reforçada levando em conta uma situação não-pavimentada ao longo de sua construção, os resultados obtidos devem ser integrados com os da situação para uma via pavimentada, pois o geossintético ao ser pré-tensionado, permite que a rodovia receba uma camada asfáltica. A recomendação é que seja feita a regularização da superfície para retirar irregularidades que aparecem pelo pré-estiramento da geogrelha, conforme figura 09 (MACCAFERRI, p. 30, 2009).

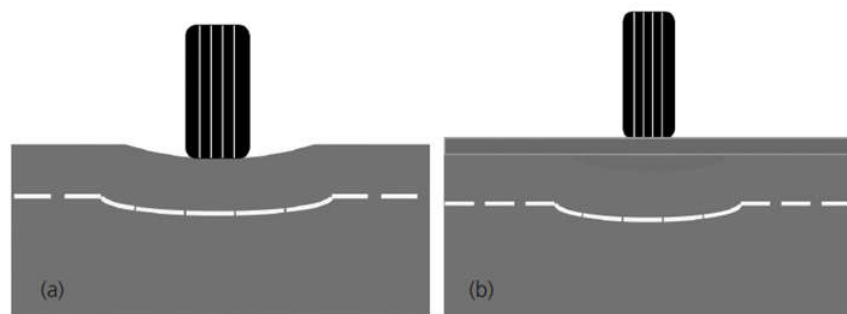


Figura 09: a) Afundamento por trilha de roda durante a fase construtiva controlado pelo reforço geossintético; b) regularização da superfície e posterior aplicação da camada asfáltica

Fonte: Manual técnico Maccaferri (2009, p. 32)

3.4 Cálculos de dimensionamento da rodovia pavimentada

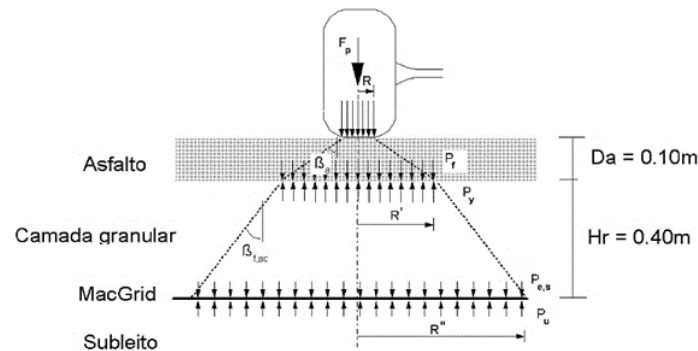


Figura 10: Esquema para o cálculo de reforço de uma rodovia pavimentada
Fonte: Manual técnico Maccaferri (2009, p. 32)

- a) Roda simples, $F_p = 90 \text{ kN}$;
- b) 150 passadas de roda por dia;
- c) Raio da área carregada sob a roda, $R = 0,20 \text{ m}$;
- d) Espessura de alfalto, $D_a = 0,10 \text{ m}$;
- e) Ângulo de distribuição de carga no alfalto, $\beta_a = 45^\circ$;
- f) Peso específico do alfalto, $\gamma_a = 20 \text{ kN/m}^3$.

1º Cálculo da espessura da camada granular para a situação não pavimentada obtido no procedimento anterior, $H_r = 0,35\text{m} \approx 0,40\text{m}$

2º Determinar R' e R''

$$R' = R + D_a \cdot \tan \beta_a = 0,30 \text{ m}$$

$$R'' = R' + H_r \cdot \tan \beta_{f,ac} = 0,64 \text{ m}$$

Em que:

$$\beta_{f,ac} = \text{ângulo de distribuição da carga depois da compactação}$$

3º Determinação da pressão na camada granular (P_f)

$$P_f = \frac{F_p}{\pi \cdot R'^2} + \gamma_a \cdot D_a = 320\text{kPa}$$

4° Determinação da máxima capacidade de suporte da camada granular (P_y), segundo Houlsby e Jewel (1990)

$$P_y = 06 \cdot R' \cdot \gamma_f \cdot N_y = 394 \text{ kPa}$$

Tabela 02: Fatores de capacidade de suporte para camadas granulares (Vesic, 1975)

| | | | | | | | | | | | | | | | | |
|------------------|------|----|------|------|------|----|------|------|----|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| ÂNGULO DE ATRITO | 30 | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 | 37 | 38 | 39 | 40 | 41 | 42 | 43 | 44 | 45 |
| N_y | 22,4 | 26 | 30,2 | 35,2 | 41,1 | 48 | 56,3 | 66,2 | 78 | 92,3 | 109,4 | 130,2 | 155,6 | 186,5 | 224,6 | 271,8 |

Fonte: Adaptado Manual técnico Maccaferri (2009, p. 33)

É necessário verificar a estabilidade da camada granular, calculada anteriormente.

$$\frac{P_y}{P_f} > 1,1 \rightarrow \frac{394}{320} = 1,2$$

5° Estimar o tráfego de projeto (N_p) que deve ser calculado com base na vida útil projetada para o pavimento

Em 20 anos, com 150 passadas por dia, tem-se que:

$$N_p = 20 \times 365 \times 150 = 1.095.000 \text{ passadas.}$$

6° Calcular a carga de roda equivalente (F_e)

As cargas dinâmicas durante a vida útil da rodovia têm influência sobre os recalques diferenciais no subleito. Para a verificação da capacidade de carga do subleito leva-se em conta os padrões de carga repetitivas e para isso calcula-se uma carga de roda equivalente (F_e). Utilizando o número de repetições do eixo padrão ao longo da vida útil do pavimento, pode-se determinar o valor de F_e por meio da equação de DeGroot et al., 1986 (MACCAFERRI, p. 30, 2009).

$$F_e = F_p \left(N_p^{\frac{1}{6,2}} \right) = 848 \text{ kN}$$

7° Determinação da pressão equivalente no subleito (P_{es})

$$P_{es} = \frac{F_e}{\pi \cdot R'^2} + \gamma_a \cdot Da + \gamma_f \cdot Hr = 669 \text{ kPa}$$

8º Determinação da máxima capacidade de suporte do subleito (P_u), segundo Houlsby e Jewel (1990), em que $N_c = 5,69$ (N_c = fator de carga)

$$P_u = N_c \cdot CBR \cdot 30 \cdot \left(\frac{R''}{R'}\right)^2 = 1748 \text{ kPa}$$

É necessário verificar a estabilidade do subleito.

$$\frac{P_u}{P_{es}} > 1,5 \rightarrow \frac{1748}{669} = 2,6 > 1,5$$

A estabilidade do subleito é atendida. Em situações em que o fator de capacidade máxima de suporte for menor que 1,5, alguns procedimentos podem ser seguidos:

- a) aumentar a espessura da camada granular;
- b) aumentar o grau de compactação da camada granular;
- c) utilizar materiais de melhor resistência;
- d) aumentar CBR do subleito através de consolidação ou métodos artificiais.

4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Comparativo de custo de uma via pavimentada com e sem geogrelha.

Considerações hipotéticas de um projeto para uma via pavimentada:

Espessura da camada granular (h_o) = 0,90 m

Espessura da camada granular reforçada com geossintético (H_r) = 0,34 m

Área da seção com geogrelha (m^2) = 2,72

Área da seção sem geogrelha (m^2) = 8,20

Comprimento total da via (m) = 600

Largura total da via (m) = 9,12

A tabela 03 relaciona os dados mencionados à cima e o cálculo de custo da aplicação da geogrelha para comparar o custo de uma via pavimentada com a utilização do reforço de geogrelha e sem a geogrelha.

Tabela 03: Comparativo de custo com e sem a geogrelha

| DESCRIÇÃO | GEOGRELHA WG40 | SEM GEOGRELHA |
|--|-------------------|------------------|
| Espessura da camada granular (ho) - (m) | 0,90 | |
| Espessura da camada granular reforçada com geossintético (Hr) - (m) | 0,34 | - |
| Redução da camada granular considerando o reforço geossintético (Δh) - (m) | 0,56 | - |
| Área da seção (m ²) | 2,72 | 8,20 |
| Largura total da via (m) | 9,12 | |
| Comprimento total da via (m) | 600 | |
| Volume (m ³) | 1631,70 | 4920,31 |
| Custo/m ³ (BGS) | R\$ 104,39 | R\$ 104,39 |
| Custo da redução da camada granular (BGS) | R\$ 170.333,16 | R\$513.630,74 |
| Custo geogrelha/m ² | R\$ 12,80 | R\$ - |
| Custo geogrelha total | R\$ 70.033,92 | R\$ - |
| Custo total | R\$ 240.367,08 | R\$513.630,74 |
| Economia | R\$ 273.263,66 | - |

Fonte: Adaptado de Zanotto (2016)

É possível observar que há uma economia na utilização da geogrelha como método de reforço pois é considerável a redução do volume de material a ser utilizado.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo deste estudo foi dimensionar a camada do subleito de um pavimento para a implantação de uma rodovia sobre um aterro de solo mole, de modo que este apresentasse a capacidade de suporte necessária para a implantação da rodovia. Existem duas alternativas possíveis para este dimensionamento, retirar o solo mole diante da viabilidade técnica e econômica para este fim ou reforçar este solo com material geossintético.

Buscou-se demonstrar o reforço do solo mole com a utilização de material geossintético, pois de modo geral, os projetos de rodovias são realizados em locais onde é comum a necessidade da retirada de mais de 4 metros de solo. O reforço geossintético escolhido para este estudo foi o MacGrid® WG 40 da empresa Maccaferri. Com a determinação da pressão equivalente e a máxima capacidade de suporte do subleito verificou-se que o mesmo apresenta a capacidade de suporte necessária para a implantação da rodovia utilizando a geogrelha. Foi possível também observar que o custo total da pavimentação utilizando como reforço a geogrelha foi inferior ao custo da pavimentação sem a mesma.

6 REFERÊNCIAS

_____. ABNT NBR 10905: solo – ensaios de palheta in situ – método de ensaio. Rio de Janeiro, 1990.

_____. ABNT NBR 12069: solo – ensaios de penetração de cone in situ (CPT) – método de ensaio. Rio de Janeiro, 1991.

_____. ABNT NBR 6484: solo – sondagens de simples reconhecimentos com SPT – método de ensaio. Rio de Janeiro, 2001.

_____. ABNT NBR 6502: Rochas e Solos. Rio de Janeiro, 1995.

_____. ABNT NBR 12007: solo – ensaio de adensamento unidimensional – método de ensaio. Rio de Janeiro, 1990.

_____. ABNT NBR 6459: solo – determinação do limite de liquidez – método de ensaio. Rio de Janeiro, 1984.

_____. ABNT NBR 7180: solo – determinação do limite de plasticidade – método de ensaio. Rio de Janeiro, 1984.

_____. ABNT NBR 7183: solo- determinação do limite e relação de contração de solos – método de ensaio. Rio de Janeiro, 1982.

ALMEIDA, M. de S. S. de. **Aterros sobre Solos Moles**. São Paulo: Oficina dos Textos, 1996.

ALMEIDA, M. de S. S. de; MARQUES, M. E. S. **Aterros sobre Solos Moles: projeto e desempenho**. São Paulo: Oficina dos Textos, 2010.

GIROUD, Jean. P.; NOIRAV, Laure. **Geotextile-Reinforced Unpaved Road Design**. 1981.

MARANGON. **Unidade 02 – Geotecnia de fundações**. Juiz de Fora:UFJF, 2018.

MASSAD, F. **Obras de Terra: curso básico de geotecnia**. São Paulo: Oficina dos Textos, 2003.

MASSAD, F. **Obras de Terra: curso básico de Geotecnia**. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

NAKAMURA, Juliana. **Fundações e contenções**. Disponível em: <<http://infraestruturaurbana17.pini.com.br/solucoes-tecnicas/28/melhoramento-de-solos-moles-conheca-as-principais-tecnicas-para-291146-1.aspx>>. Acesso em: 31 de maio de 2018.

OLIVEIRA, H. M. de. **Comportamento de aterros reforçados sobre solos moles levados à ruptura**. 2006. 495 f. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil) – Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

ORTIGÃO, J. A. R. **Aterro experimental levado à ruptura sobre argila cinza do Rio de Janeiro**. 1980. 715 f. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil) – Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1980.

PERBONI, J.P. **Análises de estabilidade e de compressibilidade de aterros sobre solos moles - caso dos aterros de encontro da Ponte sobre o Rio dos Peixes (BR-381)**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto. 2003.

PINTO, C. de S. **Curso básico de mecânica dos solos**. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

SANTANA, Teresa; RODRIGUES, Paulina F. **Ensaio de caracterização laboratorial de solos com vista à sua utilização em arquitetura de terra crua**. UNL, 2005. Disponível em: <<https://run.unl.pt/bitstream/10362/11470/1/C17%20-%20solos%20IV%20SIACOT%20Out05.pdf>>. Acesso em: 31 de maio de 2018.

SAYÃO, Alberto; SIEIRA, Ana C.; SANTOS, Petrucio. **Reforço de solos – manual técnico**. Maccaferri: São Paulo, 2013.

SCHNAID, F.; ODEBRECHT, E. **Ensaio de Campo e suas aplicações à Engenharia de Fundações**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.

SENÇO, W. **Manual de Técnicas de Pavimentação**. São Paulo: PINI, 2008.

VARELA, Marcio. **Limites de consistência**. IFRN, 2018. Disponível em: <<https://docente.ifrn.edu.br/marciovarela/disciplinas/mecanica-dos-solos/limites-de-atterberg>>. Acesso em: 31 de maio de 2018.

ZANOTTO, Caroline S. **Dimensionamento de geogrelha como reforço de solo mole em pavimento flexível**. Caxias do Sul: FSG, 2016. TCC (Bacharel em Engenharia da Civil) Centro Universitário da Serra Gaúcha, 2016.