

Projeto e controle de execução de reforço de solos moles utilizando colunas de material granular: experiência com a implantação de um grande empreendimento rodoviário

Giana Laport Alves de Souza

Mestranda - Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Brasil, giana.laport@gmail.com

Marcus Pacheco

Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Brasil, marcus_pacheco@terra.com.br

Rubenei Novais Souza

Petróleo Brasileiro S.A., Rio de Janeiro, Brasil, rubenei@petrobras.com.br

Eduardo Arreguy Viana

Petróleo Brasileiro S.A., Rio de Janeiro, Brasil, eduardo.arreguy@petrobras.com.br

RESUMO: Este trabalho apresenta considerações sobre projeto e controle de execução de reforço de solos moles utilizando colunas granulares, tendo como base uma breve revisão bibliográfica e a experiência adquirida com a implantação de uma obra rodoviária destinada ao tráfego de veículos especiais ultra-pesados localizada no município de São Gonçalo, região metropolitana do Rio de Janeiro. O objetivo do trabalho é compartilhar conhecimentos que possam contribuir para o aprimoramento de projetos futuros que envolvam a referida técnica de reforço de solos moles.

PALAVRAS-CHAVE: reforço de solos moles; colunas de brita; estabilidade; recalques.

1 INTRODUÇÃO

Entre as várias técnicas aplicáveis para tratar ou reforçar camadas de argilas moles compressíveis, a execução de colunas verticais de material granular (brita ou areia), em alguns casos revestidas com geotêxtil, tem apresentado o maior crescimento, não apenas devido às vantagens técnicas inerentes ao tipo de solução, como a redução da magnitude dos recalques e do tempo de consolidação, como também ao custo competitivo que se tem verificado ultimamente, em parte graças à introdução no país de modernos equipamentos de execução, o que resultou no aumento da disponibilidade e da produtividade desse serviço.

Recentemente, os autores do presente trabalho estiveram envolvidos no projeto e construção de uma estrada destinada ao tráfego de veículos especiais ultra-pesados no município de São Gonçalo, região metropolitana do Rio de Janeiro, onde vários trechos de ocorrência de solos moles compressíveis foram reforçados com colunas de brita. O acompanhamento do desempenho dos reforços e as retroanálises para estabelecer Lições Aprendidas desse empreendimento, visando

identificar possível aprimoramento da metodologia de projeto e/ou procedimento executivo e, assim, otimizar projetos futuros semelhantes, permitem algumas constatações importantes, as quais são apresentadas neste trabalho, atualizando e complementando o trabalho apresentado por Souza et al (2016). A metodologia de projeto e o procedimento de controle construtivo normalmente adotados no dimensionamento e execução dessas colunas são analisados, discutindo-se a representatividade de algumas premissas de projeto e de certos parâmetros de controle de execução, resultando na proposição de recomendações visando contribuir para a consolidação das melhores práticas de projeto e execução desse tipo de reforço de solos mole.

2 PROCEDIMENTOS EXECUTIVOS E RESTRIÇÕES DE APLICAÇÃO

Atualmente, as colunas granulares podem ser executadas com areia ou brita, com ou sem revestimento geotêxtil. O procedimento de execução mais comum contempla a cravação de um tubo camisa, através de martelo vibratório acoplado

no topo. Após atingir a cota de ponta prevista, o tubo é preenchido com brita ou areia e, ao se iniciar o saque, também com a ação do martelo vibratório, o tamponamento provisório na ponta do tubo se abre e a brita ou areia é compactada pela vibração, preenchendo o volume criado pelo tubo camisa. Quando o projeto contempla revestimento da coluna com geotêxtil, o mesmo é colocado no interior do tubo, preso ao topo, antes do preenchimento. Nos últimos anos foi introduzido no país um equipamento dotado de um tubo condutor de brita e de um vibrador de profundidade. Neste caso, o equipamento é cravado até a profundidade prevista através do movimento vibratório do equipamento e, então, é iniciada a subida do equipamento que, através do vibrador de profundidade e de movimentos parciais de subida e descida, forma a coluna de brita compactada. Neste procedimento não se tem registro de utilização de areia nem de revestimento geotêxtil.

A utilização de colunas granulares como reforço de camada de solos moles geralmente tem como objetivos aumentar a resistência ao cisalhamento da referida camada e reduzir os seus recalques e deslocamentos horizontais, visando garantir estabilidade geotécnica e limitar deformações de aterros e outras instalações apoiados neste tipo de solo. Como toda solução geotécnica, a execução de colunas granulares tem limitações, as quais podem estar associadas à dificuldade de se garantir a integridade dos elementos durante a execução e também a problemas de desempenho em transferir, à camada subjacente, com deformações admissíveis, as cargas devidas ao aterro e demais instalações.

Kempfert (2003), citando normas alemãs, indica que, em solos moles com resistência não drenada inferior a 15 kPa, colunas granulares são aplicáveis apenas se providas de revestimento geossintético. Tal restrição parece não ser plenamente aplicável aos principais depósitos de solos moles conhecidos no Brasil, onde colunas de brita sem revestimento têm sido executadas com sucesso em solos com resistência não drenada significativamente menor que 15 kPa.

A experiência dos autores e os dados de execução das colunas e da instrumentação dos trechos de solos moles reforçados da estrada tratada neste trabalho parecem indicar que, além da resistência não drenada, a espessura da camada de solo mole também deve ser considerada para a avaliação da aplicabilidade das colunas granulares

não revestidas. Preliminarmente, pode-se dizer que em camadas de solos moles com espessura de até cerca de 7 m e resistência não drenada média maior ou igual a 10 kPa, as colunas de brita podem ser aplicadas sem revestimento. Em condições mais severas de resistência não drenada e/ou espessura da camada de solo mole, é recomendável utilizar colunas granulares revestidas com geotêxtil de alta rigidez.

Depreende-se do exposto acima que, do ponto de vista de integridade e comportamento carga-deslocamento, as colunas granulares podem ser aplicadas em qualquer tipo de solo mole, sendo que em certas condições é preciso utilizar revestimento geotêxtil de alta rigidez. Contudo, é preciso ressaltar que a execução de colunas de brita em solos muito moles deve contemplar análise de estabilidade do equipamento de execução e do depósito local de brita, de modo a garantir a segurança e estabelecer condições otimizadas de andamento dos serviços. Tipicamente, a execução das colunas é iniciada em um trecho onde o maciço natural, ou com preparação simples, suporta adequadamente o equipamento. A partir deste ponto, com o depósito de brita à sua frente, o equipamento avança em terreno já reforçado pelas colunas executadas.

3 METODOLOGIA DE PROJETO

Segundo Kempfert (2003), o princípio básico de funcionamento das colunas de reforço é aliviar a carga na camada de solo mole e aumentar a sua resistência ao cisalhamento, levando, conseqüentemente, a uma menor deformabilidade e maior segurança contra ruptura da referida camada quando submetida a um carregamento externo. O alívio de carga resulta da redistribuição das tensões aplicadas graças à maior rigidez das colunas em relação à camada de solo mole, ao arqueamento do solo e, quando utilizado, ao reforço horizontal resistente à tração posicionado no topo das colunas. O aumento da resistência ao cisalhamento da camada mole decorre da maior resistência do material das colunas relativamente ao material natural que ocupava o mesmo volume.

Com base neste princípio básico de funcionamento, o projeto de colunas de reforço de solo mole, seja qual for a técnica de execução envolvida, deve contemplar as verificações de estabilidade e de recalques do maciço. Embora a utilização de programas computacionais de Elementos Finitos, em especial os que permitem

análise 3D, possa levar a resultados bastante realistas, dependendo evidentemente da representatividade dos modelos constitutivos e dos parâmetros de resistência e deformabilidade adotados para o solo natural, material da coluna e, quando utilizados, elementos geossintéticos, ainda é predominante, no meio técnico brasileiro, a utilização de métodos analíticos simplificados, os quais são tratados neste trabalho.

Segundo Almeida e Marques (2010), os métodos analíticos mais utilizados, em geral desenvolvidos a partir da metodologia proposta por Priebe (1995), baseiam-se no conceito de célula unitária, que corresponde à área sob a influência de uma coluna, conforme apresentado esquematicamente na Figura 1.

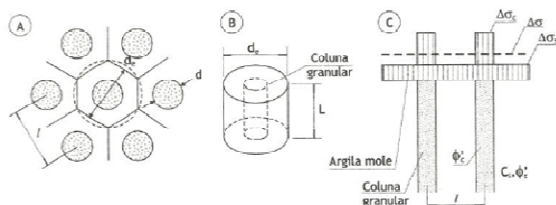


Figura 1: Representação esquemática da célula unitária, Almeida e Marques (2010).

Como pode ser observado na Figura 1, levando-se em conta a configuração geométrica da distribuição das colunas e o espaçamento entre elas, é possível determinar a razão de substituição, a_c , definida como a razão entre a área da seção transversal da coluna, A_c , e a área da célula unitária, A . Além disso, o conceito de célula unitária estabelece que, em função da maior rigidez das colunas, a distribuição da carga do aterro e/ou da sobrecarga aplicada ocorre de modo não uniforme, havendo uma concentração de tensões nas colunas, o que leva à necessidade de se definir o fator de concentração de tensões n , dado pela razão entre os acréscimos de tensões verticais na coluna, $\Delta\sigma_{vc}$, e no solo mole, $\Delta\sigma_{vs}$.

Castro e Sagaseta (2008) apresentam uma análise mostrando que, quando se considera as colunas e o solo plenamente confinados, o fator de concentração de tensões resulta igual à razão entre os respectivos módulos confinados. Os próprios autores argumentam que tal condição tende a não ser verificada na prática devido à influência da deformação lateral das colunas, mas é razoável considerar que o fator de concentração de tensões igual à razão entre os módulos confinados da coluna

e do solo mole representa um valor de envoltória correspondente à máxima eficiência do reforço.

Barksdale e Bachus (1983), citados por Han (2010), estabeleceram, com base em ensaios de laboratório, uma correlação entre o fator de concentração de tensões n e os módulos de elasticidade da coluna, E_c , e do solo mole, E_s , conforme apresentado na expressão 1 abaixo:

$$n = 1 + 0,217 \left(\frac{E_c}{E_s} - 1 \right) \quad (1)$$

Segundo Han (2010), testes de campo têm mostrado que o fator de concentração de tensões normalmente varia entre 2 e 5. O referido autor recomenda que, para a estimativa do fator n , a razão entre os módulos E_c e E_s deve ser limitada a 20, tendo em vista que as colunas não poderiam mobilizar resistência mais de 20 vezes superior à do solo mole devido à plastificação do aterro sobrejacente. Esta é uma questão a ser verificada com o aumento da experiência brasileira com esta técnica, principalmente considerando os casos de reforço com colunas associado à utilização de geogrelhas de alta rigidez na base do aterro.

3.1 Verificação de estabilidade

A verificação de estabilidade geotécnica de maciços reforçados com colunas geralmente é realizada admitindo o solo tratado como um material homogêneo, cujos parâmetros de resistência c_m e ϕ_m são ponderados em função dos parâmetros de resistência do solo mole e do material da coluna, da razão de substituição a_c e do fator de concentração de tensões n . Segundo Almeida e Marques (2010), um dos métodos mais utilizados é o proposto por Priebe (1995) que, combinando as teorias da elasticidade e dos empuxos de Rankine, chegou às expressões 2, 3 e 4 apresentadas a seguir:

$$\tan \phi_m = m \tan \phi_c + (1 - m) \tan \phi_s \quad (2)$$

$$c_m = (1 - m)c_s \quad (3)$$

$$m = \frac{a_c n}{[1 + (n - 1)a_c]} \quad (4)$$

onde:

ϕ_m = ângulo de atrito interno do solo tratado

ϕ_c = ângulo de atrito interno do material da coluna

ϕ_s = ângulo de atrito interno do solo mole natural

C_m = ângulo de atrito interno do solo tratado
 C_s = ângulo de atrito interno do solo mole natural
 $a_c = A_c/A$ = razão de substituição
 A_c = área da seção transversal da coluna
 A = área de solo mole de influência da coluna

Considerando que, nos casos mais comuns de reforço de solos moles utilizando colunas, a ruptura analisada é do tipo não drenada, o ângulo de atrito do solo mole a ser tratado pode ser tomado como nulo e a expressão 2 pode ser simplificada, resultando na expressão 5 apresentada abaixo:

$$\tan \phi_m = m \tan \phi_c \quad (5)$$

A partir dos parâmetros de resistência ponderados C_m e ϕ_m do solo tratado e da geometria da seção analisada, pode-se aplicar um método de análise de estabilidade clássico. As Figuras 2 e 3 apresentam análises de estabilidade de uma das seções de estudo do projeto de São Gonçalo, considerando, respectivamente, a condição sem e com tratamento do solo mole. Como pode ser observado, sem o tratamento do solo mole, a seção analisada não seria estável, pois o coeficiente de segurança calculado é de apenas 0,6. A execução de colunas de brita com 90cm de diâmetro espaçadas de 2,5m em malha triangular aumenta o coeficiente de segurança para 1,35.

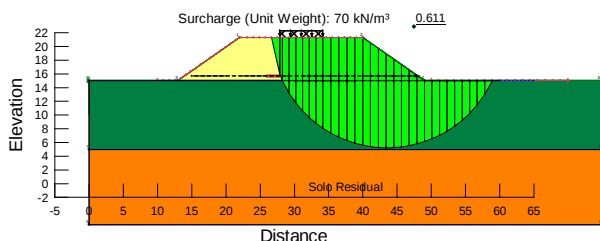


Figura 2: Análise de estabilidade geotécnica de uma seção com solo mole sem tratamento.

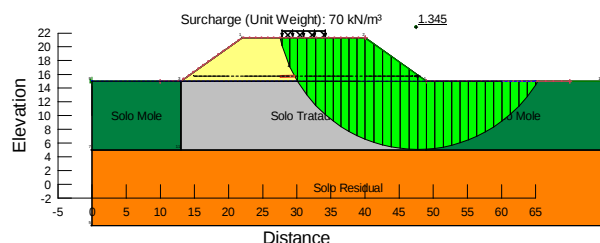


Figura 3: Análise de estabilidade geotécnica de uma seção com solo reforçado com colunas de brita.

3.2 Verificação de deformações

A verificação de deformações ou recalques de aterros sobre solos moles compressíveis geralmente contempla a estimativa da magnitude e da

velocidade desses recalques, visto que, como o adensamento ocorre ao longo do tempo, na maioria dos casos excedendo o período de construção, tanto a magnitude quanto a velocidade dos recalques afetam as decisões de projeto e o desempenho da obra. No caso de solo mole reforçado com colunas, embora a magnitude do recalque seja muito inferior àquela que seria prevista com o solo mole na condição natural, continua sendo importante estimar, com a maior precisão possível, a magnitude e a velocidade desse recalque, de modo a subsidiar projetos eficientes que economizem recursos naturais, evitem retrabalhos e favoreçam condições otimizadas de operação dos empreendimentos. Segundo Almeida e Marques (2010), os métodos analíticos de estimativa de recalque de solo mole reforçado com colunas geralmente utilizam o conceito de fator de redução de recalque β , definido como a razão entre o recalque do solo mole natural Δh e o recalque do solo tratado Δh_t , para uma dada sobrecarga aplicada, conforme a expressão 6:

$$\beta = \frac{\Delta h}{\Delta h_t} \quad (6)$$

Esses autores consideram que o recalque do solo mole natural Δh pode ser expresso em função do seu módulo edométrico E_{ms} , da espessura da camada compressível h_s e da respectiva variação da tensão efetiva $\Delta \sigma_v$, conforme a expressão 7. Por sua vez, o recalque global da camada de solo tratado é admitido como igual ao recalque do solo mole entre as colunas, provocado pela pequena variação de tensão efetiva nesta área devido à maior rigidez das colunas, conforme a expressão 8. Com base nessas considerações, os autores concluem que o fator de redução de recalque β pode ser obtido a partir do fator de concentração de tensões n e da razão de substituição a_c , conforme apresentado nas expressões 9 e 10.

$$\Delta h = \frac{h_s \Delta \sigma_v}{E_{ms}} \quad (7)$$

$$\Delta h_t = \frac{h_s \Delta \sigma_{vs}}{E_{ms}} \quad (8)$$

$$\beta = \frac{\Delta h}{\Delta h_t} = \frac{\Delta \sigma_v}{\Delta \sigma_{vs}} = \frac{\Delta \sigma_v [1 + (n-1)a_c]}{\Delta \sigma_v} \quad (9)$$

$$\beta = 1 + (n-1)a_c \quad (10)$$

onde:

Δh = recalque do solo mole na condição natural

Δh_t = recalque do solo tratado

h_s = espessura da camada de solo mole compressível

$\Delta\sigma_v$ = variação da tensão efetiva na camada de solo mole compressível, na condição natural
 $\Delta\sigma_{vs}$ = variação da tensão efetiva no solo mole entre as colunas de reforço
 E_m = módulo de compressão edométrica do solo mole
 β = fator de redução de recalques

Como se depreende das expressões 7 a 10, a formulação proposta por Almeida e Marques (2010) considera o solo mole em compressão edométrica, portanto sem deformação lateral. Além disso, ao admitir que o recalque global da camada de solo mole tratado é igual ao recalque do solo mole entre as colunas, a referida formulação pressupõe que o limite inferior da camada de solo mole e a base das colunas são indeslocáveis. Este pressuposto é comum nas metodologias de estimativa do fator de redução de recalques β . Priebe (1995), cujo trabalho é uma das principais referências sobre previsão do comportamento de solos reforçados com colunas, também considera a coluna apoiada em camada rígida, portando com a base indeslocável, e o recalque do topo da coluna igual ao recalque do solo mole entre as colunas, mas admite a deformação lateral da coluna, chegando a uma formulação para a estimativa do fator de redução de recalques β que é função da razão de substituição a_c , do coeficiente de Poisson do solo mole ν e do coeficiente de empuxo ativo do material da coluna $K_{a,c}$, conforme apresentado nas expressões 11 a 13 abaixo:

$$\beta = 1 + a_c \left[\frac{0,5 + f(\nu, a_c)}{K_{a,c} * f(\nu, a_c)} - 1 \right] \quad (11)$$

$$K_{a,c} = \tan^2 \left(45^\circ - \frac{\phi_c}{2} \right) \quad (12)$$

$$f(\nu, a_c) = \frac{1 - \nu^2}{1 - \nu - \nu^2} * \frac{(1 - 2\nu)(1 - a_c)}{1 - 2\nu + a_c} \quad (13)$$

onde:

β = fator de redução de recalques

ν = coeficiente de Poisson do solo mole

$K_{a,c}$ = coeficiente de empuxo ativo do material da coluna

Depreende-se do exposto acima que, na aplicação de métodos analíticos, a estimativa da magnitude do recalque do solo mole tratado depende apenas da estimativa do recalque por adensamento que a camada de solo mole experimental sem tratamento e da determinação do fator de redução de recalque β .

A Tabela 1 apresenta o resumo dos parâmetros de compressibilidade da camada de

argila mole e as características do reforço executado no caso da seção de estudo do projeto de São Gonçalo, apresentada nas Figuras 2 e 3, e a Tabela 2 apresenta o resumo das estimativas do recalque previsto do solo reforçado segundo as metodologias propostas por Almeida e Marques (2010), Priebe (1985) e uma proposta alternativa, considerando o fator de concentrações de tensões n igual ao valor de envoltória discutido por Castro e Sagaseta (2008) e a estimativa do recalque previsto através da formulação de Almeida e Marques (2010).

Tabela 1: Parâmetros representativos da seção de estudo do projeto de São Gonçalo

Espessura da camada de solo mole	10 m
Resistência não drenada do solo mole (S_u)	10 kPa
Constante de compressibilidade $C_c/(1+e_0)$	0,375
Módulo confinado do solo mole (E_{ms})	600 kPa
Coeficiente de Poisson do solo mole (ν)	0,3
Coeficiente de adensamento vertical	0,0002 cm^2/s
Coeficiente de adensamento horizontal	0,0004 cm^2/s
Resistência não drenada do solo mole (S_u)	10 kPa
Peso específico aparente do solo mole	14 kN/m^3
Ângulo de atrito do material da coluna (ϕ)	40 Graus
Diâmetro das colunas	0,9 m
Espaçamento das colunas	2,5 m
Razão de substituição	0,12
Módulo confinado da coluna (E_{mc})	40000 kPa
Coeficiente de Poisson da brita (ν)	0,4
Altura total do aterro	6 m
Peso específico aparente do aterro	20 kN/m^3

Tabela 2: Resumo das estimativas da magnitude do recalque da seção de estudo do projeto de São Gonçalo

Característica do reforço	A. e M. (2010)	Priebe (1985)	Alternativa
Fator de concentração de tensões (n)	18	18	59
Fator de redução de recalques (β)	3,02	1,63	7,9
Recalque estimado do solo tratado (Δh)	1,05m	1,94m	0,40m

Como o trecho da estrada correspondente à seção de estudo tratada nas Figuras 2 e 3 e nas Tabelas 1 e 2 ainda está em processo de adensamento, não é possível estabelecer uma conclusão definitiva sobre a eficácia das estimativas da magnitude do recalque apresentadas, mas como se mostra adiante, a comparação da evolução com o tempo dos recalques medido e estimado indica que a estimativa alternativa parece ser mais representativa. Em todo caso, mesmo, considerando apenas os resultados dessas estimativas e certos aspectos das respectivas metodologias, é possível estabelecer algumas constatações que podem ser importantes para projetos futuros. A primeira é que, embora haja uma redução significativa em relação à previsão com o solo mole na condição natural, a magnitude do recalque de solos moles compressíveis tratados com colunas granulares continua sendo bastante elevada, o que pode ser incompatível com certos projetos de implantação industrial ou de sistemas de transporte. A segunda

constatação importante é que, como as metodologias de estimativa do recalque admite que as colunas são apoiadas em camada indeformável, o critério de parada da cravação do tubo camisa ou do vibrador de profundidade, de modo a garantir embutimento satisfatório das colunas em solo resistente, é de grande relevância para o controle das deformações do aterro. Por fim, pelo que se pôde observar na aplicação das metodologias analisadas à seção de estudo do projeto de São Gonçalo, a consideração da deformação lateral da coluna tem uma influência significativa na estimativa da magnitude de recalque do solo reforçado, resultando que tal aspecto precisa ser melhor estudado de modo a se definir os limites de resistência e deformabilidade, do solo mole e das colunas, em que uma ou outra condição pode ser considerada representativa.

A estimativa da velocidade do recalque de solos moles reforçados com colunas granulares geralmente considera as colunas funcionando como drenos verticais que estabelecem uma drenagem horizontal na camada compressível, conforme a teoria de Barron (1948), resumida nas expressões 14 a 17.

$$\bar{U}_h = 1 - e^{-[8T_h / F]} \quad (14)$$

$$T_h = \frac{C_h * t}{d_e^2} \quad (15)$$

$$F = \frac{N^2}{N^2 - 1} \ln(N) - \frac{3N^2 - 1}{4N^2} \quad (16)$$

$$N = \frac{d_e}{d_c} \quad (17)$$

onde:

$\bar{U}_h$ = Porcentagem média de adensamento da camada mole devido ao fluxo horizontal

T_h = Fator tempo para drenagem horizontal

F = Fator de densidade de drenos

C_h = Coeficiente de adensamento horizontal

t = tempo de adensamento

d_e = diâmetro de influência de um dreno ou coluna

d_c = diâmetro do dreno ou coluna

Em certos casos, para levar em conta o efeito do amolgamento do solo mole, provocado pelo processo de execução das colunas, na redução da permeabilidade do solo no entorno das mesmas, é usual somar ao fator de densidade de drenos F o fator de amolgamento F_s dado pela expressão 18.

$$F_s = \left(\frac{k_h}{k_{hs}} - 1 \right) \ln \left(\frac{d_s}{d_c} \right) \quad (18)$$

onde:

k_h = Permeabilidade horizontal do solo mole na condição natural

k_{hs} = Permeabilidade horizontal do solo mole amolgado

d_s = Diâmetro da área afetada pelo amolgamento, normalmente adotado como $2d_c$

Como a ocorrência do fluxo horizontal devido à inclusão dos drenos verticais não impede o fluxo vertical da água na camada compressível, este sempre ocorre. Assim, em projetos de aterros sobre solos moles reforçados com colunas granulares, normalmente se considera as drenagens horizontal e vertical combinadas, através da teoria apresentada por Carrillo (1942), resumida na expressão 19. A porcentagem média de adensamento da camada mole devido ao fluxo vertical normalmente é estimada através da teoria do adensamento unidirecional de Terzaghi.

$$\bar{U} = 1 - [(1 - \bar{U}_h)(1 - \bar{U}_v)] \quad (19)$$

onde:

$\bar{U}$ = Porcentagem média de adensamento da camada mole devido aos fluxos horizontal e vertical

$\bar{U}_v$ = Porcentagem média de adensamento da camada mole devido ao fluxo vertical

Han (2010) propõe a aplicação da metodologia descrita acima utilizando parâmetros de adensamento modificados em função da geometria e da rigidez do reforço, conforme apresentado nas expressões 20 a 23.

$$C_{vm} = C_v \left(1 + n \frac{a_c}{1 - a_c} \right) \quad (20)$$

$$C_{hm} = C_h \left(1 + n \frac{a_c}{1 - a_c} \right) \quad (21)$$

$$T_{vm} = \frac{C_{vm} * t}{H_d^2} \quad (22)$$

$$T_{hm} = \frac{C_{hm} * t}{d_e^2} \quad (23)$$

onde, além dos parâmetros já definidos, tem-se:

C_{vm} = Coeficiente de adensamento vertical do solo mole reforçado

C_v = Coeficiente de adensamento vertical do solo mole natural

C_{hm} = Coeficiente de adensamento horizontal do solo mole reforçado

T_{vm} = Fator tempo do adensamento vertical do solo mole reforçado

T_{hm} = Fator tempo do adensamento horizontal do solo mole reforçado

H_d = Altura de drenagem vertical na camada de solo mole

Han (2010) também propõe uma modificação do fator de densidade dos drenos F a ser adotado na estimativa da porcentagem média de adensamento da camada mole devido ao fluxo horizontal, visando levar em conta a redução da permeabilidade do solo mole devido ao amolgamento provocado pela execução da coluna, conforme apresentado na expressão 24 abaixo:

$$F = \frac{N^2}{N^2 - 1} \left(\ln \frac{N}{S} + \frac{k_h}{k_{hs}} \ln S - \frac{3}{4} \right) + \frac{S^2}{N^2 - 1} \left(1 - \frac{k_h}{k_{hs}} \right) \left(1 - \frac{S^2}{4N^2} \right) + \frac{k_h}{k_{hs}} \frac{1}{N^2 - 1} \left(1 - \frac{1}{4N^2} \right) + \frac{32}{\pi^2} \left(\frac{k_h}{k_c} \right) \left(\frac{H_d}{d_c} \right)^2$$

onde, além dos parâmetros já definidos, tem-se:

N = Razão entre o diâmetro da área de influência da coluna, d_e , e o diâmetro da coluna d_c

S = Razão entre o diâmetro da área amolgada, d_s , e o diâmetro da coluna d_c

k_h = Permeabilidade horizontal do solo mole natural

k_{hs} = Permeabilidade horizontal do solo mole amolgado

k_c = Permeabilidade do material da coluna

A Figura 4 apresenta a aplicação dessas metodologias de estimativas da porcentagem média de adensamento ao longo do tempo à seção de estudo do projeto de São Gonçalo. Como pode ser observado, embora haja uma enorme redução do tempo de adensamento em relação ao previsto para o solo mole na condição natural, que, no caso em análise, atingiria cerca de 33 anos para processamento de 90% do recalque total, as três estimativas indicam um tempo ainda relativamente longo de adensamento, cerca de 2 anos, que também pode ser incompatível com certos projetos de implantação industrial ou de sistemas de transporte. A Figura 4 também mostra que a estimativa conforme a teoria de Barron (1948) levando em conta o amolgamento do solo mole no entorno da coluna é praticamente coincidente com a estimativa conforme a proposta de Han (2010).

Embora o adensamento do solo tratado na seção de estudo do projeto de São Gonçalo ainda esteja na fase inicial, é possível fazer uma comparação entre os recalques estimado e medido da referida seção, como a apresentada na Figura 5. Na referida figura, além da curva de recalque

medido, são apresentadas duas curvas de recalque estimado. Uma delas considera o recalque total estimado conforme a metodologia de Almeida e Marques (2010) e a outra o recalque total estimado pela metodologia alternativa, apresentado na Tabela 2. Ambas as curvas de recalque estimado contemplam o recalque elástico ou imediato, cerca de 0,20m, e o processamento do recalque por adensamento conforme a teoria de Barron (1948), levando em conta o amolgamento do solo mole no entorno das colunas. Como as placas de recalque foram danificadas durante a execução do aterro, a medição de recalques, iniciada cerca de 20 dias após a conclusão do aterro, foi realizada através de marcos superficiais. Como pode ser observado, nesta fase inicial do adensamento, o recalque medido é muito próximo do estimado pela metodologia alternativa.

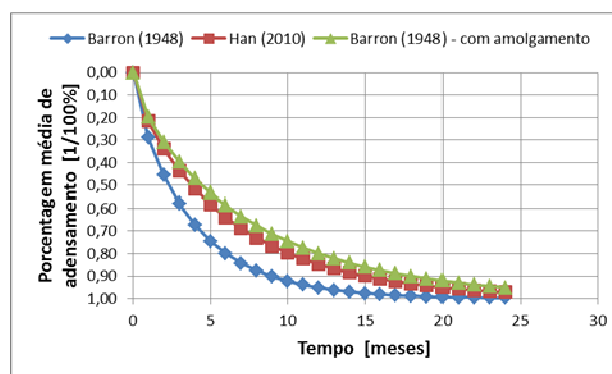


Figura 4: Estimativa da porcentagem média de adensamento do solo tratado ao longo do tempo na seção de estudo do projeto de São Gonçalo.

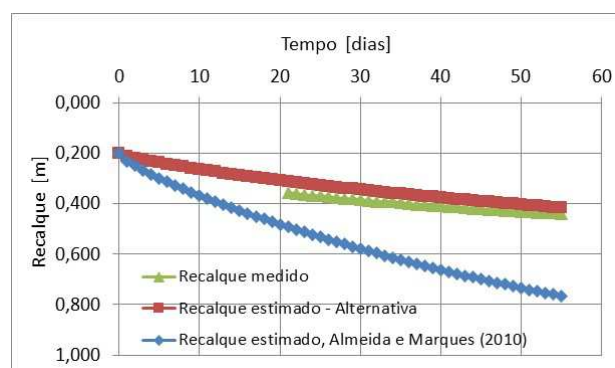


Figura 5: Comparação entre recalques estimado e medido na seção de estudo (E497) do projeto de São Gonçalo.

4 CONTROLE DE EXECUÇÃO

Um procedimento de controle de execução eficiente de qualquer elemento de construção deve contemplar todas as variáveis que influenciam significativamente o desempenho e a durabilidade do elemento, envolver o mínimo de recurso possível

e evitar morosidade e retrabalho. Tendo como base tal pressuposto, a experiência adquirida na implantação do projeto de São Gonçalo e considerando as premissas de projeto e as características das colunas determinantes do comportamento do reforço, conforme discutido na análise das metodologias de projeto apresentada, pode-se concluir que um procedimento de controle adequado à execução de colunas granulares para reforço de solos moles deve contemplar a locação precisa dos elementos e a verificação do diâmetro, profundidade, integridade e resistência das colunas.

4.1 Diâmetro

No caso de coluna de material granular executada através da cravação de um tubo-camisa provisório com o diâmetro igual ao diâmetro de projeto da coluna, este resulta assegurado. Quando a coluna é executada utilizando equipamento provido de tubo de menor diâmetro com sistema de vibração em profundidade, o diâmetro da coluna depende do tempo e da movimentação do tubo vibratório ao longo do seu comprimento. Neste caso, é recomendável que a empresa executora apresente detalhadamente o procedimento a ser adotado em um determinado projeto, devendo o diâmetro ser verificado através da escavação parcial e vistoria de uma coluna teste em local representativo da obra.

4.2 Profundidade

A profundidade das colunas de material granular normalmente é estimada em projeto e deve ser confirmada no campo através de algum critério de parada de cravação. Tal critério de parada deve envolver apenas recursos disponíveis no campo e assegurar que as colunas atravessem a camada de solo mole e resultem embutidas em material mais resistente, compatível com a premissa de indelocabilidade da base das colunas considerada no projeto. Algumas empresas dispõem de sistema de monitoração que registra o tempo, a profundidade cravada e a intensidade de corrente elétrica no motor do vibrador, resultando em um gráfico tempo x profundidade x corrente que, tipicamente, mostra um aumento da corrente elétrica quando a cravação fica mais difícil. A experiência com a obra rodoviária tratada neste trabalho mostrou que é possível e recomendável realizar cravações teste em locais próximos de sondagens disponíveis e definir, para um dado perfil geotécnico, um critério de parada baseado na intensidade de corrente.

4.3 Integridade

No caso de coluna de material granular executada através da cravação de um tubo-camisa provisório, a integridade da coluna resulta assegurada, uma vez que o tubo-camisa normalmente é totalmente preenchido antes de começar o saque. Quando a coluna é executada utilizando equipamento provido de tubo de menor diâmetro com sistema de vibração em profundidade, a integridade da coluna depende da movimentação do tubo vibratório ao longo do seu comprimento. Neste caso, é recomendável que a empresa executora apresente detalhadamente o procedimento a ser adotado em um determinado projeto, devendo a integridade ser verificada através de provas de carga estática e, se aplicável, escavação e vistoria de uma coluna teste em local representativo da obra.

4.4 Resistência

A resistência das colunas granulares depende basicamente da granulometria e formas dos grãos do material utilizado e da vibração aplicada. Geralmente são adotados ângulos de atrito entre 35 e 40 graus para areia e 40 a 45 graus para brita. Assim, o controle de execução em relação a essa variável deve ser baseado na verificação da qualidade e pureza do material utilizado e da vibração aplicada.

5 CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou resumidamente o resultado parcial de uma pesquisa sobre projeto e execução de colunas granulares como reforço de solos moles, baseado em uma breve revisão bibliográfica e na experiência adquirida com o projeto e construção de uma estrada destinada ao tráfego de veículos especiais ultra-pesados na região metropolitana do Rio de Janeiro. As principais conclusões do trabalho são:

- a) Os projetos deste tipo de reforço devem ser iniciados pela avaliação de aplicabilidade da técnica em termos das condições de garantia de integridade e rigidez das colunas. Os resultados preliminares da pesquisa indicam que em camadas de solos moles com espessura de até cerca de 7 m e resistência não drenada média maior ou igual a 10 kPa, as colunas de brita podem ser aplicadas sem revestimento. Em condições mais severas de resistência não drenada e/ou espessura da

camada de solo mole, é recomendável utilizar colunas granulares revestidas com geotêxtil de alta rigidez;

- b) A análise de estabilidade do equipamento de execução e do depósito local de brita deve ser contemplada nas verificações de projeto, de modo a subsidiar a definição do caminhamento dos serviços no campo, garantindo segurança e condições otimizadas do andamento da obra;
- c) De acordo com os métodos analíticos de previsão, o recalque de solos moles compressíveis tratados com colunas granulares depende da espessura e das características de compressibilidade da camada mole, bem como do espaçamento, diâmetro e rigidez das colunas. Em função disso, o controle de execução das colunas, principalmente a garantia de embutimento em material resistente e a integridade, é grande relevância para o sucesso do reforço.
- d) A comparação com o recalque medido em uma seção de estudo do projeto tratado neste trabalho, a qual ainda está em processo de adensamento, indica que as previsões através das duas metodologias analisadas foram muito conservadoras, apresentando recalque estimado muito superior ao medido. Uma metodologia alternativa, considerando para o fator de concentrações de tensões n o valor de envoltória discutido por Castro e Sagaseta (2008) e a estimativa do recalque previsto através da metodologia de Almeida e Marques (2010), se mostrou aderente aos valores medidos.

Castro, J. e Sagaseta, C. (2008). Consolidation around stone columns. Influence of column deformation. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 33:851-877.

Han, J. (2010). Consolidation settlement of stone column-reinforced foundation in soft soils. *New Techniques on soft soils*. Almeida, M. (Ed.). Editora Oficina de Textos, São Paulo.

Kempfert, H.G. (2003). Ground improvement methods with special emphasis on column-type techniques. *International Workshop on Geotechnics of Soft Soils – Theory and Practice*. Vermeer, Schweiger, Karstunen & Cudny (Ed.). VGE.

Priebe, H.J. (1995). The design of vibro replacement. *Ground Engineering*, p.31-37, Dec.

Souza, G.L.A., Pacheco, M.P., Souza, R.N e Viana, E.A. (2016). Considerações sobre projeto e controle de execução de reforço de solos moles utilizando colunas de material granular. 15 CNG / 8 CLBG, Porto, Portugal.

REFERÊNCIAS

Almeida, M.S.S e Marques, M.E.S. (2010). Aterro sobre solos moles: projeto e desempenho. Editora Oficina de Textos, São Paulo.

Barksdale, R.D. e Bachus, R.C. (1983). Design and construction of stone columns. Report No. FHWA/RD-83/026, National, Technical Information Service, Springfield, Virginia, USA.

Barron, R.A. (1948). Consolidation of fine-grained soils by drains wells. *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE*, v.73, n.6, p.811-835.

Carrillo, N. (1942). Simple two and three dimensional cases in the theory of consolidation of soils. *Journal of Math. and Phys.*, v.21, p.1-5.