



PROVA DE CARGA E ANÁLISE DE ESTABILIDADE GLOBAL DE UM GRUPO DE COLUNAS DE AREIA ENCAMISADAS COM GEOSSINTÉTICOS

Marc Raithel, Dimiter Alexiew e Volker Küster

Tradução: **Cristina F. Schmidt**

Este artigo foi originalmente publicado nos anais da Conferência Internacional de Melhoria e Controle de Solos – Austrália, 2012

As colunas granulares encamisadas com geossintéticos compõem um sistema de fundação que consiste em colunas preenchidas com materiais não coesivos confinados e compactados, que atravessam as camadas de solo mole e se apoiam no substrato competente subjacente, assim transferindo as cargas permanentes e móveis. As colunas são envolvidas por um geotêxtil que, quando submetido a um esforço na direção radial, aplica uma tensão confinante nas colunas que estão inseridas no solo mole. Portanto, o geotêxtil sofre deformações devido a forças de tração anelares. Com a utilização de colunas granulares encamisadas, os recalques máximos e diferenciais são reduzidos, quando comparados aos recalques de colunas granulares convencionais não encamisadas. Comparando-se com sistemas que não utilizam geotêxtil, a alternativa com o encamisamento possui a vantagem de aplicação em solos muito moles como, por exemplo, em turfa ou siltes com baixa resistência, argilas e lamias. Além disso, a dissipação do excesso de poropressões e a consolidação do solo são aceleradas e a estabilidade global no período construtivo e na operação da obra é maior.

Para fins de verificação e possivelmente modificação de métodos de cálculo, foi executada uma prova de carga em 2011. O teste consistia no carregamento em etapas de um grupo de 10 colunas, acompanhado por um intensivo programa de monitoramento. A comparação entre o comportamento previsto e os resultados das medições mostra que a estabilidade global parece eventualmente ser subestimada quando são utilizados métodos de cálculo convencionais.

O comportamento real das colunas granulares encamisadas foi registrado através de uma prova de carga em uma área com dimensões de 10 m x 10 m. O solo local é formado por camadas de solos orgânicos, argilosos e turfosos, com espessura de, aproximadamente, 6 m a 7 m. Abaixo dessas camadas, encontram-se areias medianamente compactas, que constituem o substrato de apoio das colunas.

No terreno do ensaio foram instaladas 10 colunas encamisadas construídas pelo método de deslocamento de solo. De forma a reduzir o tempo de duração do ensaio, acelerando a consolidação dos solos moles, foram cravados adicionalmente drenos verticais dispostos em malha quadrada com espaçamento de 0,5 m. Também foi executada uma vala com 1 m de profundidade lateralmente ao local do ensaio, de forma a facilitar a ocorrência de ruptura global, com uma geometria mais controlada. A Figura 1 mostra a planta e a seção transversal da montagem da prova de carga.

Os dados principais do arranjo das colunas adotado são:

- Área de cobertura: 12,5%
- Distância de centro a centro entre colunas: 2,16 m
- Diâmetro: 800 mm
- Geotêxtil de encamisamento das colunas: Ringtrac 100/100

O geotêxtil para reforço das colunas possui resistência à tração nominal de 100 kN/m, módulo de rigidez a 5% de deformação de 950 kN/m e deformação máxima na resistência nominal de 12% na direção perimetral. O carregamento sobre as colunas foi feito progressivamente com três níveis de contêineres tipo 20', primeiramente posicionados e depois preenchidos com areia, e sobre eles uma camada de sacos com areia. Carregamentos adicionais com contêineres eram tecnologicamente inviáveis.

Para a previsão dos recalques, estimativa da concentração de tensões e a força de tração radial nas colunas foi utiliza-

do o modelo analítico axissimétrico proposto por Raithel (2000), Raithel (2008) e Alexiew *et al.* (2012). Este modelo de cálculo é mostrado na Figura 2 retirada da Recomendação

Alemã EBGEO 2011.

Baseando-se no conceito de célula unitária, considera-se uma única coluna em uma malha virtual infinita de colunas. Em combinação com o solo mole circundante, o geotêxtil radial proporciona confinamento lateral à coluna. Para colunas não encamisadas, o solo mole deve ser capaz de equilibrar sozinho as pressões horizontais internas exercidas pelo material de preenchimento, que tende a se expandir lateralmente. Com as colunas granulares encamisadas com geossintéticos, o suporte horizontal pelo solo mole pode ser bastante reduzido, uma vez que há adicionalmente ao efeito do confinamento radial do encamisamento. Quando o sistema é carregado, forças de compressão radial do geossintético são ativadas, aumentando a capacidade de carga e a rigidez da coluna. Assim, ocorre uma concentração de cargas nas colunas e alívio das tensões verticais no topo dos solos moles, devido ao efeito do arqueamento do aterro, levando à redução significativa dos recalques. Como as colunas atuam simultaneamente como drenos verticais de grandes dimensões, a dissipação do excesso de poropressão necessária ao equilíbrio do sistema ocorre rapidamente.

A eficiência das colunas granulares encamisadas com geossintéticos depende basicamente da concentração das cargas nas colunas associada com o alívio de carregamento das camadas moles, que é possível graças ao efeito do arqueamento no aterro. No sistema de colunas granulares encamisadas com geossintéticos, a relação entre a sua rigidez e a do solo mole é menor que no caso de estacas completamente rígidas, resultando em um sistema de fundação mais flexível e autorregulador, com recalques relativamente pequenos e similares entre a coluna e a camada de solo circundante.

Os recalques medidos em função dos estágios de carregamento e do tempo são retratados na Figura 3. Como esperado, os recalques se desenvolvem dependendo do tempo e da carga, de acordo com o processo de consolidação. O recalque máximo correspondente ao final do processo de consolidação foi atingido em três semanas após a aplicação do carregamento máximo. Não há recalques diferenciais significativos entre o topo da coluna e a superfície do solo mole, confirmando uma das hipóteses do

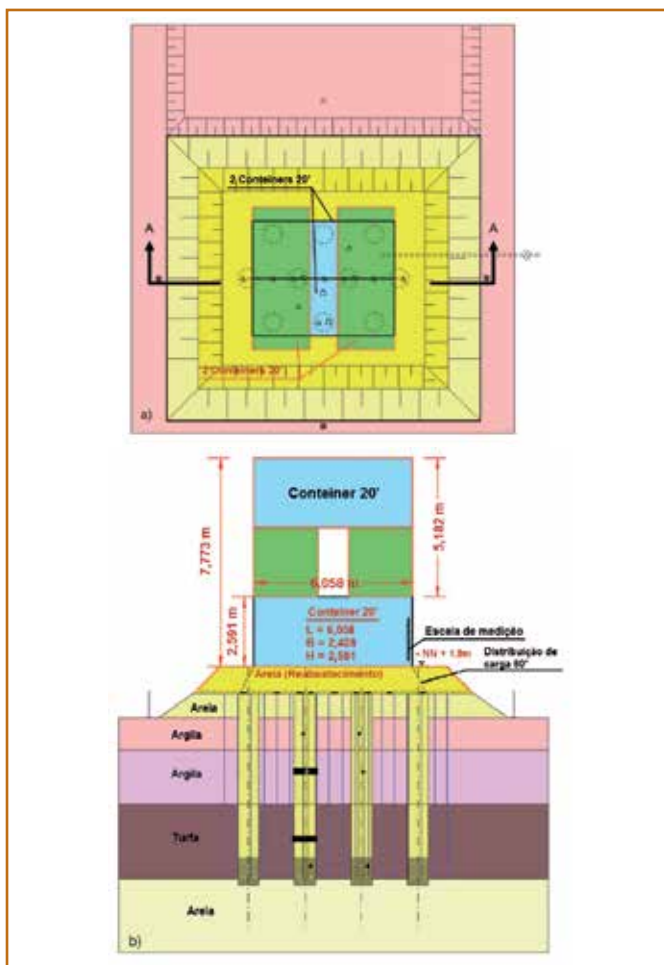


Figura 1 - Planta e seção transversal do estágio final da prova de carga

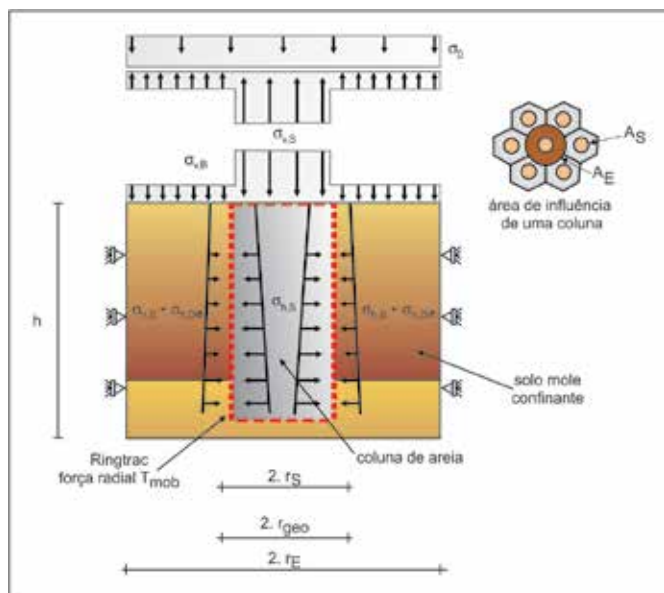


Figura 2 - Modelo de cálculo e interpretações esquemáticas para o comportamento estrutural

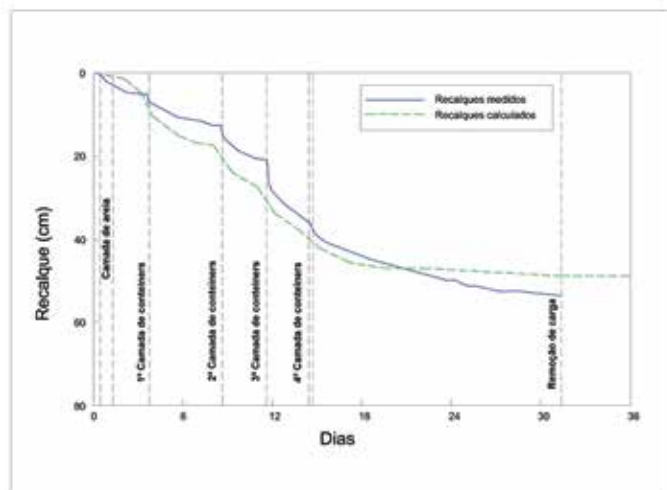


Figura 3 - Curva de recalques em função do tempo

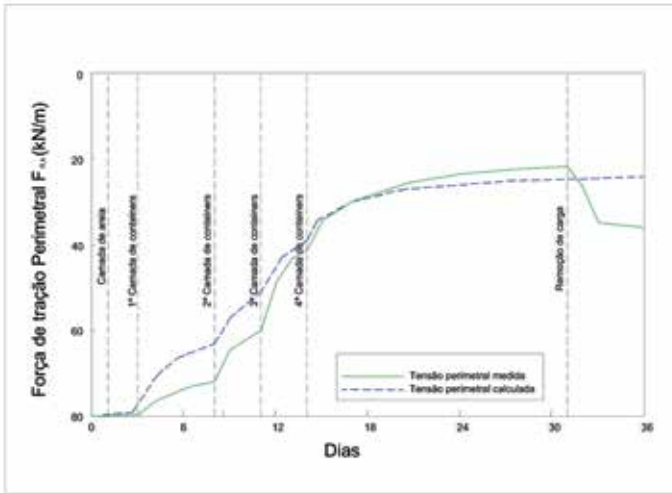


Figura 4 – Gráfico de força de tração perimetral mobilizada no anel geossintético em função do tempo

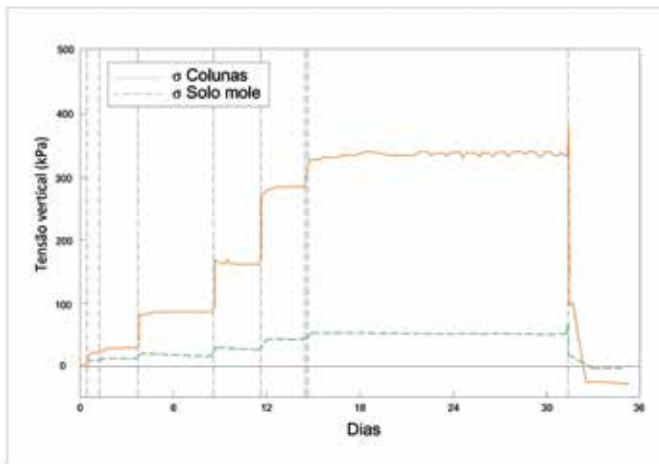


Figura 5 – Concentração de tensões verticais nas colunas e alívio das tensões no topo do solo mole

método analítico de cálculo. Na Figura 3, é apresentada a curva de recalque máximo previsto, mostrando valores bastante similares à curva de comportamento real. A Figura 4 apresenta resultados típicos para as tensões de tração na direção perimetral do geossintético. Em solos muito moles, principalmente quando se utiliza o método de deslocamento para execução das colunas, o dimensionamento e a instrumentação em obras anteriores indicam a ocorrência de contração das colunas, logo após sua instalação e no alteamento das primeiras camadas do aterro. Este fenômeno foi verificado novamente neste ensaio, seguido pelo alongamento do geossintético para níveis mais elevados de carregamento. Com base nas medidas de deformação em campo e nas isócronas do geotêxtil utilizado (Ringtrac 100/100 de poliéster), foi estimada a tensão de tração no anel (Figura 4). Novamente, semelhantemente ao comportamento dos recalques, ambos os valores previstos e medidos estão em boa concordância, especialmente no estágio da última carga, durante o desenvolvimento da consolidação.

A concentração da tensão no topo da coluna granular encamisada com geossintético é mostrada na Figura 5. A maior parte da carga ocorre imediatamente após a aplicação da carga, em cada estágio. Durante a consolidação a carga nas colunas permaneceu praticamente constante.

Já a estabilidade global foi calculada utilizando-se o método de Bishop. O acréscimo da resistência ao cisalhamento da fundação, causado pela concentração de carga nas colunas, pode ser modelado tanto pela resistência ao cisalhamento média (solo mole e colunas) ou pela consideração direta das colunas no modelo, como por exemplo, em Bergado *et al.* (1994) e Priebe (1995). Ambos os métodos baseiam-se na concentração de cargas, que significa o acréscimo de tensões no material com alta resistência ao cisalhamento das colunas granulares. Assim, a redistribuição de cargas entre o solo mole e as colunas é o parâmetro mais importante para determinar o acréscimo de resistência ao cisalhamento. Cálculos comparativos mostram que os melhores resultados são obtidos quando as colunas são consideradas como muros semi-infinitos, com mesma área de cobertura e inclusão de tensões nas colunas e no solo mole, conforme Figura 6. Assim, o sistema de fundação tridimensional com colunas é transformado em um modelo bidirecional semi-infinito, para fins de análise de estabilidade global.

A determinação da concentração de tensões correspondente à redistribuição diretamente após a aplicação da carga é necessária para um prognóstico real. A concentração de carga neste estágio (condição não drenada) pode ser determinada aproximadamente pelo uso de parâmetros não drenados (rigidez não drenada e coesão não drenada) pelo cálculo analítico das colunas.

Mesmo para análises de estabilidade considerando as medições reais de tensões concentradas e em modelos tridimensionais, o sistema deveria alcançar o estado de falha ao 4º nível de carregamento, embora isso não tenha acontecido *in situ*. Resultados de pesquisa recente demonstram que a instalação dos elementos geossintéticos verticais geralmente pode aprimorar a estabilidade global. O teste apresentado parece confirmar este efeito do reforço vertical do geotêxtil de encamisamento da coluna.

A intenção da prova de carga foi a de levar a coluna granular encamisada com geossintético à ruptura para verificar a capacidade real última de suporte. Infelizmente nenhuma

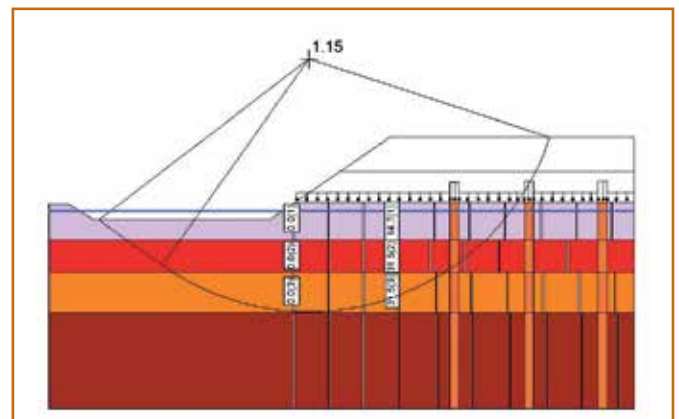


Figura 6 – Análise de estabilidade global



Figura 7 – Exemplo de preenchimento das colunas com material granular

sim, os autores esperam proporcionar um passo mais adiante para aperfeiçoar o cálculo do sistema de fundação com o uso de colunas granulares encamisadas com geossintéticos. ☺

REFÊRENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alexiew, D.; Raithele, M.; Küster, V.; Detert, O. (2012): 15 years of experience with geotextile encased granular columns as foundation system. *Proceedings of TC 211 Recent Research, Advances & Execution Aspects of Ground Improvement Works*, IS-GI, Brussels.

Bergado, D. T., Chai, J. C., Alfaro, M. C., Balasubramaniam, A. S. (1994): *Improvement Techniques of Soft Ground in Subsiding and Lowland Environment*; A. A. Balkema.

EBGEO (2011): *Recommendations for Design and Analysis of Earth Structures using Geosynthetic Reinforcements*; DGGT German Geotechnical Society, Ernst & Sohn.

Raithele, M., Kempfert, H.-G. (2000): Calculation Models for Dam Foundations with Geotextile Coated Sand Columns. *Proceedings of the International Conference on Geotechnical & Geological Engineering GeoEng 2000*, Melbourne.

Raithele, M.; Kirchner, A. (2008): Calculation techniques and dimensioning of encased columns – Design and state of the art. *Proceedings of the 4th Asian Regional Conference on Geosynthetics*, Shanghai.

Priebe, H.J. (1995) The design of Vibro Replacement, *Ground Engineering* (Dec), pp 31–37.

falha ocorreu. Positivamente, o sistema demonstra uma margem de segurança maior do que a esperada.

O recalque e as tensões perimetrais no anel geossintético podem ser previstos de forma segura pelos recentes métodos de cálculo (Recomendação alemã EBGEO 2011). Os resultados não esperados das elevadas condições de estabilidade global deverão ser avaliados e quantificados por análises detalhadas futuras e pesquisas posteriores, assim como simulações numéricas. As-

SOLOS MOLES?

CPR[®]
CONSOLIDAÇÃO PROFUNDA RADIAL

O MAIS RÁPIDO E EFETIVO TRATAMENTO PARA SOLOS MOLES

www.engegraut.com.br