XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/20

Aspectos de Dimensionamento e Execução de Aterros Estaqueados - Caso de Obra em Rio das Pedras, Jacarepaguá, Rio de Janeiro

Cristina F. Schmidt
Diretora Técnica, Huesker Ltda., São José dos Campos, Brasil, cristina@huesker.com.br

Mateus Cleto
Gerente Comercial, Huesker Ltda., São José dos Campos, Brasil, mateus.cleto@huesker.com.br

Luis Brian Fuentes
Gerente de Engenharia, Huesker Ltda., São José dos Campos, Brasil, brian.fuentes@huesker.com.br

RESUMO: Aterros estaqueados são estruturas mistas onde um aterro compactado é apoiado sobre fundações profundas tipo estaca, em áreas de ocorrência de solos moles compressíveis e de baixa capacidade de carga. Seu conceito básico de funcionamento baseia-se no fenômeno de arqueamento do solo, que resulta no encaminhamento da maior parte das cargas de peso próprio do aterro e sobrecarga operacional diretamente para as estacas da fundação, sem a necessidade de se construir uma laje contínua na base do aterro. As estacas verticais, as estacas inclinadas nos bordos dos aterros, os capitéis no topo das estacas e o aterro compactado são componentes de aterros estaqueados convencionais. O uso adicional de geogrelhas e geotêxteis tecidos de alta resistência à tração e baixa deformação no topo dos capitéis traz otimizações quanto ao arranjo geométrico da solução, permitindo aumentar o espaçamento entre estacas e dispensar as estacas inclinadas do bordo do aterro, por exemplo. Ainda que as metodologias de cálculo sejam bem conhecidas e relativamente simples, os detalhes e cuidados construtivos são fundamentais para o bom desempenho dessas obras na fase operacional. O artigo aborda alguns aspectos das metodologias de cálculo utilizadas atualmente no Brasil e discute boas práticas executivas para garantir o desempenho adequado da solução. Por fim, apresenta o caso de obra de uma escola na comunidade de Rio das Pedras em Jacarepaguá, na cidade do Rio de Janeiro, construída em terreno com espessas camadas de solos argilosos moles, onde a solução de aterro estaqueado foi escolhida para a estabilização das áreas de pátios no entorno da construção em função do alto controle de recalques na fase operacional e exíguo tempo de execução.

PALAVRAS-CHAVE: Aterro Estaqueado, Geogrelha PVA, Capitel, Aterro sobre Solos Moles, Controle de Recalque.

ABSTRACT: Piled embankments are composite systems in which a compacted embankment is supported by deep foundations (piles) in areas underlain by soft, highly compressible soils with low bearing capacity. Their fundamental load transfer mechanism is based on the soil arching effect, whereby most of the embankment self-weight and operational surcharge loads are transferred directly to the foundation piles, eliminating the need for a continuous load transfer slab at the base of the embankment. Conventional piled embankments comprise vertical piles, battered piles along the embankment edges, pile caps at the pile heads, and the compacted embankment fill. The additional use of high-tensile-strength, low-strain geosynthetics, such as geogrids and woven geotextiles, placed over the pile caps provides significant optimization of the geometric arrangement of the system. This reinforcement allows for increased pile spacing and may eliminate the need for battered piles at the embankment edges, for instance. Although the design methodologies are well established and relatively straightforward, construction details and quality control measures are critical to ensuring satisfactory performance during the operational phase. The paper addresses selected aspects of the design methodologies currently adopted in Brazil and discusses construction best practices required to ensure the adequate performance of the system. Finally, a case study is presented involving the construction of a school in the community of Rio das Pedras, in Jacarepaguá, in the city of Rio de Janeiro, Brazil. The site is

characterized by thick layers of soft clay deposits. A piled embankment solution was selected for the stabilization of the surrounding yard areas due to the strict settlement control requirements during the operational phase and the limited construction timeframe.
KEYWORDS: Piled Embankment, PVA Geogrid, Pile Caps, Embankments on Soft Soils, Settlement Control.

1 INTRODUÇÃO

Nas palavras do professor Carlos de Souza Pinto, "*o projeto de aterros sobre argilas moles é um dos mais bonitos e interessantes tópicos da Engenharia Geotécnica*" (Almeida e Marques, 2010). A construção dessas estruturas traz como principal desafio garantir as condições de estabilidade e as deformações compatíveis com o uso, no curto prazo e ao longo de sua vida útil. Dentre as diversas soluções para estabilização de aterros sobre solos moles, a técnica de aterros estaqueados vem se popularizando no Brasil nos últimos anos. A primeira obra de aterro estaqueado com geogrelhas em nosso país foi executada no final da década de 1990, em Chapadão do Sul, MS (Vertematti, 2015). A construção de aterros sobre elementos de estacas para redução de recalques e aumento de estabilidade tem se mostrado economicamente viável, principalmente quando o prazo para execução da obra é reduzido. Sua utilização é imediata após a conclusão do aterro, não necessitando de tempo de espera para a operação.

Segundo a norma DNIT 381/2022, o aterro estaqueado em obras viárias deve ser classificado como Classe I e atender aos critérios de estabilidade e deformações desta classe de aterros. Além de fatores de segurança mínimos variando de 1,2 (período construtivo) a 1,5 (longo prazo), os aterros Classe I devem apresentar recalques residuais de 2 cm em 10 anos e 5 cm em 25 anos. Aterros estaqueados bem dimensionados e bem executados atendem satisfatoriamente os critérios restritos de recalques residuais da norma, sendo a manutenção praticamente inexistente da obra durante a fase de operação. Outro aspecto importante é a segurança às estruturas vizinhas quanto a deslocamentos horizontais na camada de solos moles, o chamado "efeito Tschebotarioff". Como o peso do aterro e as cargas operacionais são transmitidas para as camadas mais resistentes e profundas através das estacas, o acréscimo de tensões verticais no solo mole é mínimo, com reduzidas deformações horizontais na camada compressível.

O uso de geogrelhas e geotêxteis de alta resistência à tração e baixa deformação sobre os capitéis possibilita a absorção da parcela das cargas verticais não transmitida diretamente às estacas por arqueamento e garante a estabilidade dos taludes contra o risco de ruptura por empuxos horizontais excessivos. Como consequência, é possível aumentar o espaçamento da malha das estacas, otimizando a solução.

Há diversas metodologias para dimensionamento de aterros estaqueados reforçados com geossintéticos, sendo a mais utilizada no Brasil a norma britânica BS8006-1, devido à sua simplicidade. Em um aterro estaqueado, o carregamento vertical é distribuído para as estacas, para o reforço geossintético e para o subsolo entre capitéis, conforme figura a seguir:

- Parcela A, transmitida diretamente às estacas, por arqueamento.
- Parcela B, transmitida às estacas através do geossintético.
- Parcela C, sustentada pelo subsolo entre os capitéis.

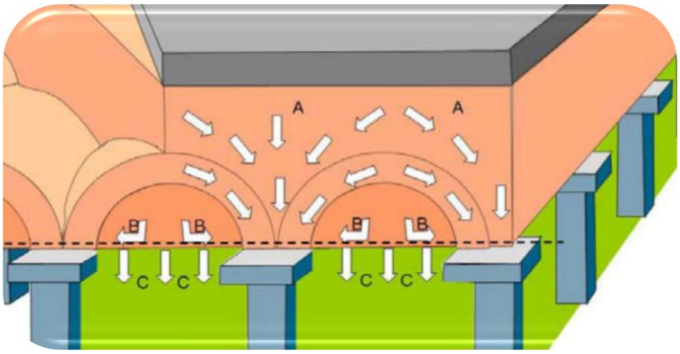


Figura 1. Divisão das cargas verticais em três partes (Van Eecklen, 2016).

2 ASPECTOS DE DIMENSIONAMENTO E CONSTRUTIVOS

Se por um lado o dimensionamento de um aterro estaqueado é um procedimento relativamente simples, sua execução requer cuidados especiais e atenção. O projeto deve levar em consideração as condições de contorno durante as fases executiva e operacional da obra, com detalhamento minuncioso dos elementos do sistema, incluindo a paginação dos painéis, a ancoragem dos geossintéticos e a sequência executiva. As falhas pontuais identificadas em algumas obras estão associadas a problemas executivos ou falhas no detalhamento do projeto. O executor deve cumprir todas as orientações do projeto. A instrumentação e o acompanhamento da obra é fundamental para garantir seu adequado desempenho na fase operacional. A seguir são comentados aspectos de dimensionamento e execução dos elementos que compõem uma estrutura em aterro estaqueado.

2.1 Estacas

As estacas podem ser pré-moldadas ou moldadas in loco, ter ou não capitéis no topo e, em geral, representam o item de maior custo da obra. Sua distribuição em planta deve considerar que a sobreposição lateral entre painéis adjacentes de geossintéticos se dê preferencialmente centrada nas estacas. Por exemplo, para uma geogrelha com largura de 5 m, o espaçamento da malha de estacas deve ser preferencial entre 2,0 m e 2,4 m, com sobreposição entre painéis de 1,0 m a 0,2 m, respectivamente. Essa é uma condição desejável, mas não obrigatória. Para aterros baixos, pode ser particularmente importante.

As estacas deverão ser dimensionadas para suportar a totalidade das cargas verticais, assim como o eventual atrito negativo. O atrito negativo pode ter origem nos recalques devidos à construção da plataforma de trabalho para execução das próprias estacas, entre outras possibilidades.

É fundamental que haja rigor geométrico na execução das estacas; os desvios de locação em planta não devem ser superiores a 10 cm (Van Eecklen, 2016). O vão livre entre capitéis influencia substancialmente a solicitação no reforço geossintético. Por exemplo, para um aterro rodoviário com altura de 2,5 m e sobrecarga operacional de 20 kPa, capitéis com dimensões de 80 cm x 80 cm e espaçamento entre estacas de 2,25 m x 2,25 m, um desalinhamento de 10 cm na locação da estaca resulta em um aumento de 17% na solicitação à tração da geogrelha:

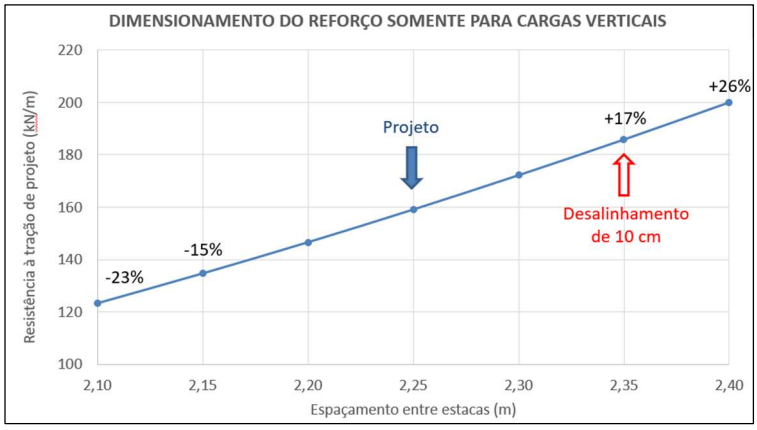


Figura 2. Influência do espaçamento entre estacas na solicitação do reforço geossintético.

Caso haja quebra de estacas e seja necessário instalar estacas adjacentes, havendo perda do alinhamento entre elas, é interessante que sejam providos capitéis maiores sobre tais estacas para garantir a manutenção do vão livre projetado em todos os lados do capitel. Neste caso, sugere-se prever a instalação de um painel adicional de geogrelha na área afetada, incluindo, pelo menos, uma linha de estacas além de cada lado da área afetada pela estaca quebrada. Caso a camada de solos moles se estenda além dos limites do aterro estaqueado, a transição para os trechos não estaqueados pode ser feita através do aumento gradual do espaçamento entre estacas, a redução da profundidade de apoio das estacas ou a execução de uma laje de transição, de forma a minimizar possíveis recalques diferenciais. Além disso, nas estacas das bordas, é relevante verificar a

possibilidade de ocorrência de carregamentos assimétricos, levando a deslocamentos horizontais na camada de solos moles e carregamentos horizontais adicionais nas estacas.

2.2 Capitéis

Capitéis com geometria adequada e bem confeccionados são fundamentais para o sucesso da solução. Os capitéis podem ser pré-moldados ou moldados in loco, apoiados no topo das estacas ou engastados às estacas. O modo de conexão entre o capitel e a estaca é determinante na definição dos momentos fletores no topo das estacas. Seu dimensionamento estrutural deve ser feito por calculista estrutural.

Os capitéis não devem apresentar bordas vivas e sim bordas arredondadas ou chanfradas, de forma a minimizar potenciais danos mecânicos ao reforço geossintético. Sobre os capitéis, recomenda-se pelo menos a colocação de um geotêxtil não tecido com gramatura mínima de 600 g/m, como proteção contra abrasão da geogrelha, com dimensões superiores às do capitel em 20 cm para cada lado. Medidas adicionais de proteção como a inclusão de uma camada de areia sobre o geotêxtil não tecido também podem ser adotadas.

Os capitéis devem ser instalados preferencialmente acima do terreno, sendo os vãos entre capitéis preenchidos com material pouco compacto. Essa condição facilita o pré-tensionamento do reforço geossintético durante a execução do aterro, minimizando recalques na fase de operação.

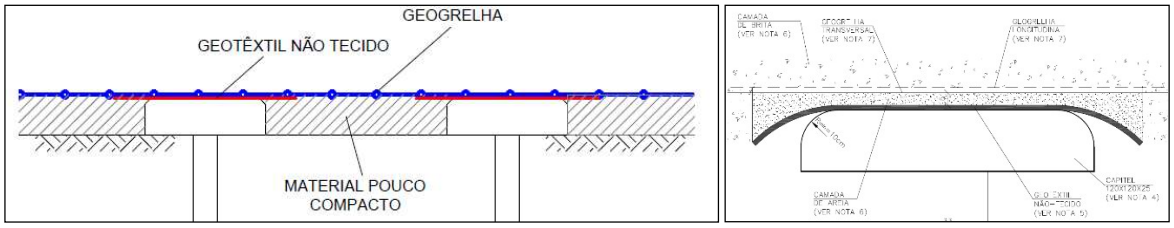


Figura 3. DetalheS da instalação dos capitéis.



Figura 4. Capitéis chanfrados sendo lixados após a desforma e capitéis com bordas arredondadas.

2.3 Reforço Geossintético – Geogrelhas e Geotêxteis Tecidos de Alta Resistência

Soluções em aterro estaqueado exigem reforço geossintético nas direções transversal e longitudinal, que pode ser configurado com duas camadas de geogrelhas ou geotêxteis tecidos unidirecionais de alta rigidez à tração posicionadas perpendicularmente entre si ou uma camada de reforço bidirecional, com painéis adjacentes devidamente costurados, para garantir a transmissão de esforços no sentido transversal. No caso de geogrelhas unidirecionais, a costura não é necessária.



Figura 5. Detalhe de costura de geogrelhas bidirecionais na obra e ensaio de tração em costura.

Um aspecto importante no dimensionamento da solução refere-se à definição do geossintético de reforço. Sua máxima deformação deve ser limitada, de forma a minimizar recalques diferenciais na superfície do aterro. Quanto menor a altura do aterro, mais crítica será essa condição. A norma britânica BS8006-1 recomenda que o reforço deva apresentar uma deformação máxima de 6% para garantir que todos os carregamentos sejam transferidos para as estacas. Nos casos de aterros baixos, onde a altura do aterro for menor do que 70% do vão livre entre capitéis, a deformação máxima no reforço deve ser limitada a 3%.

Os painéis devem estar posicionados seguindo o alinhamento dos eixos de locação das estacas. A eventual construção de uma plataforma de trabalho para dar suporte aos equipamentos durante a execução do aterro e a própria cravação das estacas poderão gerar pequenos recalques na superfície do terreno. Se esses recalques continuarem após a construção do aterro estaqueado, poderá ocorrer um "descolamento" da geogrelha em relação ao terreno de fundação. Essa hipótese de cálculo, recomendada na BS8006-1, deve ser considerada no dimensionamento do reforço, adotando-se que a reação vertical do terreno de fundação na geogrelha é zero (Parcela C, Figura 2), uma vez que a geogrelha não estará apoiada no terreno natural, nos vãos dos capitéis. Conforme já mencionado, a sobreposição lateral entre painéis adjacentes de geogrelha deverá ocorrer preferencialmente sobre os capitéis. Sobreposições no sentido longitudinal da geogrelha devem ser evitadas. Caso necessárias, seu comprimento pode ser calculado em função da resistência ao cisalhamento da interface solo-geogrelha e da resistência à tração de projeto da geogrelha e deve ter comprimento mínimo cobrindo três linhas de estacas.

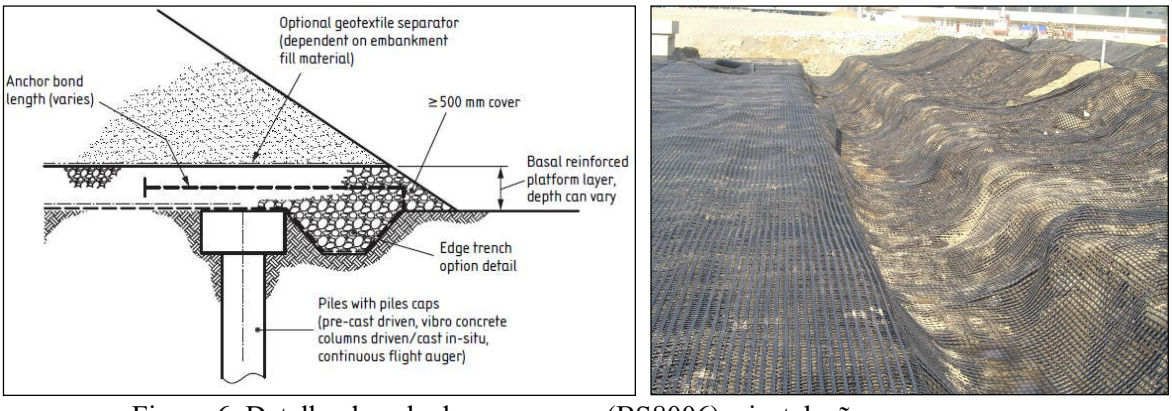


Figura 6. Detalhe da vala de ancoragem (BS8006) e instalação em campo.

As extremidades dos painéis de geogrelha devem estar devidamente ancoradas no sentido de sua maior resistência, utilizando-se valas de ancoragem e/ou envelopamentos, conforme exemplo ao lado. A execução do aterro na parte interna do aterro estaqueado só deve ser iniciada com todas as extremidades das geogrelhas já ancoradas. Ou seja, o aterro deve ser executado de "fora para dentro", a partir das valas de ancoragem.

2.4 Aterro Compactado

Para a execução dos aterros, deve-se dar preferência a solos mais granulares. Algumas bibliografias internacionais recomendam que se tenha uma plataforma de material granular para transferência de cargas na base do aterro, imediatamente acima da geogrelha, deixando os solos mais finos para as camadas mais altas do aterro. Entretanto, a grande maioria dos aterros estaqueados no Brasil não conta com essa plataforma granular e apresenta bom desempenho, sendo usados comumente solos mais finos e laterizados para execução do aterro.

O solo de cobertura deve ser espalhado e compactado de modo que minimize o risco de formação de dobras e movimentações da geogrelha; o sentido de lançamento do solo deve ser coincidente com o das sobreposições. O aterro pode ser executado diretamente sobre a geogrelha e a compactação deve ser leve nas primeiras camadas de aterro. As máquinas e equipamentos de construção não devem operar em contato direto com a geogrelha. Um mínimo de 15 cm de solo deve ser espalhado sobre a geogrelha para permitir o tráfego de máquinas. Além disso, deve-se evitar grandes velocidades e paradas repentinas para minimizar as movimentações da geogrelha durante a construção do aterro.

Conforme citado anteriormente, o princípio de funcionamento dos aterros estaqueados é o arqueamento do solo. Segundo a BS-8006, a perda de sustentação do arco do aterro pode se dar na sua base ou no topo. Para aterros altos, a eficiência de arqueamento é crítica na base (E_{cap}), enquanto para aterros baixos, o topo do arco é o ponto mais crítico (E_{crown}).

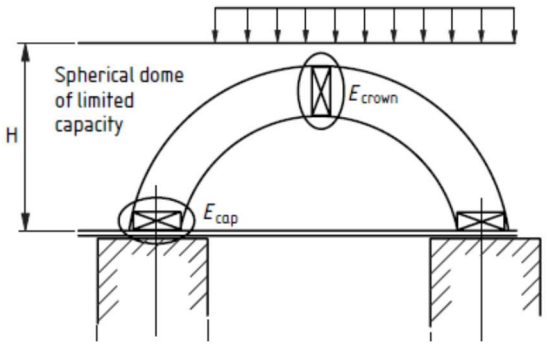


Figura 7. Eficiência de arqueamento do aterro no topo (E_{crown}) e na base (E_{cap}).

Dessa forma, especial atenção deve ser dada à fase construtiva do aterro, principalmente com alturas pequenas de aterro, onde a eficiência de arqueamento no topo (E_{crown}) pode ser crítica. A Figura 8 apresenta a variação da resistência requerida pelo geossintético em função da altura de aterro para o mesmo exemplo do aterro da Figura 2.

Pela figura a seguir, vê-se que a altura de aterro com menor solicitação no reforço é 2,50 m. Para alturas menores ou maiores do que essa, a tração no geossintético é maior. Na prática da obra, significa que se deve evitar tráfego pesado contínuo de equipamentos para baixas alturas de aterro ou, caso essa situação seja inevitável em campo, dimensionar o aterro estaqueado para essa situação. Nem sempre um aterro mais baixo do que o considerado em projeto significa uma condição mais favorável.

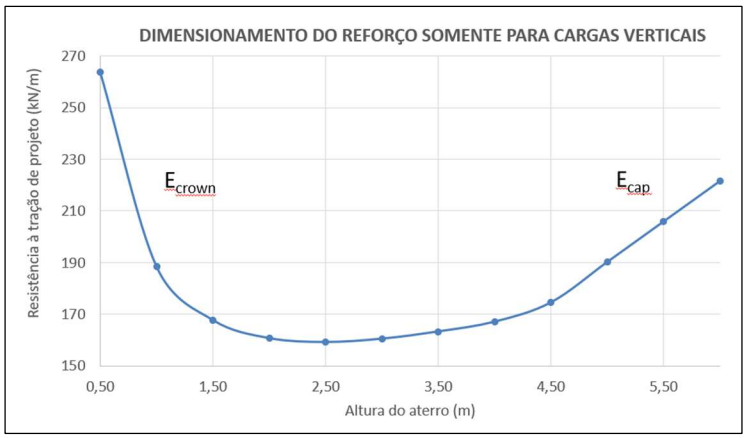


Figura 8. Solicitação de tração no geossintético em função da altura de aterro.

O tráfego de veículos também tem impacto diferente no reforço em aterros mais altos ou mais baixos. Para aterros baixos, o espraiamento das cargas de tráfego é menor, chegando mais esforço no reforço geossintético. Para aterro altos, o espraiamento ao longo da espessura do aterro é maior, com menor solicitação do reforço.

3 PROJETO ESCOLA DO AMANHÃ – RIO DAS PEDRAS, RIO DE JANEIRO

Localizado na baixada de Jacarepaguá, o terreno destinado à construção de uma unidade do projeto Escolas do Amanhã da Prefeitura Municipal do Rio de Janeiro apresentava camadas espessas de solos argilosos moles com baixíssima capacidade de suporte, com nível d'água aflorante e de difícil acesso. O prazo de obra exíguo era mais um dos desafios impostos à construção do colégio. Para implantação da obra, foi adotada a solução de aterro estaqueado com geogrelhas e geotêxteis tecidos de alta resistência à tração e baixa deformabilidade na área ao redor das edificações.

Para o estaqueamento do terreno foram utilizadas estacas com 33 cm de diâmetro e espaçamento de até 3 m em malha quadrada, com capitéis quadrados com dimensões 1,2 m x 1,2 m. O detalhamento dos capitéis incluiu chanfros em sua face superior, minimizando riscos de dano mecânico nos geossintéticos. Sobre os capitéis foi aplicada uma camada de geotêxtil tecido de poliéster, seguida de uma camada de geogrelha de poliéster, ambos com resistência à tração característica de 400 kN/m, sobre a qual foi executado o aterro com altura de cerca de 2 m. Os painéis dos geossintéticos foram posicionados ortogonalmente entre si, de forma a se obter uma plataforma bidirecional. Todos os materiais foram entregues à obra acompanhados dos respectivos resultados de ensaio de tração faixa larga do lote de fabricação. Para minimizar as perdas dos geossintéticos, foram fornecidos à obra desenhos com a paginação dos painéis e o plano de corte de todas as bobinas. A seguir são apresentadas algumas fotografias da execução da obra.



Figura 9. Capitéis sobre as estacas e colocação do geotêxtil tecido de 400 kN/m no sentido transversal



Figura 10. Colocação da geogrelha de 400 kN/m no sentido longitudinal e execução das primeiras camadas de aterro compactado com equipamento leve.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A solução de aterros estaqueados com geossintéticos apresenta uso crescente no Brasil em áreas de ocorrência de solo moles. A transmissão das cargas verticais para os estratos mais resistentes do subsolo através das estacas minimiza o carregamento das argilas moles sotopostas, evitando recalques e deformações horizontais relevantes, na projeção do aterro e nas vizinhanças da obra. Suas principais vantagens são rapidez de execução, garantia de estabilidade durante e após a construção e recalques praticamente inexistentes na vida útil da obra, resultando em baixa manutenção. O projeto deve levar em consideração as condições de contorno durante as fases executiva e operacional da obra, com detalhamento minuncioso dos elementos do sistema, incluindo a paginação dos painéis, a ancoragem dos geossintéticos e a sequência executiva. A execução rigorosa segundo as orientações do projeto é fundamental para o sucesso da solução.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem pelo compartilhamento das informações do projeto pela Redav Serviços de Engenharia, pelo acesso à obra por parte da Construtora Zadar e pelas fotos da instalação fornecidas pela Geomaks Comércio de Geossintéticos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Almeida, M.S.S. A., Marques, M. E. S. (2010). *Aterros sobre solos moles: projeto e desempenho*. Oficina de Textos.

British Standards Institution. (1986). BS 8006 *Code of Practice for Strengthened/Reinforced Soils and Other Fills*.

DNIT (2022). 381/2022 *Projeto de aterros sobre solos moles para obras viárias – Procedimento*. Brasília.

Van Eekelen, S. J., Brugman, M. H. (2016). *Design guideline basal reinforced piled embankments*.

DGGT (2012) *Recommendations for design and analysis of earth structures using geosynthetic reinforcements - EBGEO.*

Vertematti, J. C. (2015). *Manual brasileiro de geossintéticos*. Editora Blucher.