



Muro de Contenção de Grande Altura em Solo Reforçado com Geogrelhas e Face em Tela Metálica Rotulada e Galvanizada

Paulo José Brugger

Engenheiro, Brugger Engenharia Ltda, São José dos Campos – SP, Brasil, paulo@brugger.eng.br

Sandra V. R. Nakahara Yamana

Engenheira, Grupo Monto, São Paulo – SP. sandra.nakahara.ps@grupomonto.com.br

Mário Cepollina

Engenheiro, Cepollina Eng. Consultores, São Paulo – SP, mariocepollina@cepollina.com.br

Boris Schpun

Engenheiro, Cepollina Eng. Consultores, São Paulo – SP, boris@cepollina.com.br

Cristina Schmidt

Engenheira, Huesker Ltda., São José dos Campos – SP, cristina@huesker.com.br

RESUMO: O trabalho apresenta um caso de obra de um muro de contenção de grande altura construído em solo reforçado com geogrelhas de PVA com deformação máxima de 5% na resistência à tração característica e face em tela metálica rotulada e galvanizada. A implantação do muro foi concebida para a ampliação de um centro logístico localizado no município de Cajamar, SP, para aumentar a área da estrutura mantendo a mesma cota de piso do galpão existente. Para criar o platô respeitando as áreas de preservação permanentes no entorno, foi necessária a implantação de um muro de contenção com face quase vertical e com alturas entre 6 e 34 metros. O trabalho apresenta a concepção da obra, as investigações geotécnicas para a fundação do muro e para o controle dos materiais do aterro compactado, detalhes do projeto e da construção. São apresentadas as análises de estabilidade e a instrumentação do muro através de medidas de deslocamento em 10 pontos da face.

PALAVRAS-CHAVE: Muros de contenção, Solo reforçado, Geossintético, Geogrelha

ABSTRACT: The paper presents a case study of a very high retaining wall built in reinforced soil with PVA geogrids with a maximum deformation of 5% in the characteristic tensile strength and face in folding and galvanized wire mesh. The implementation of the wall was necessary for the expansion of a distribution center located in the municipality of Cajamar, SP, where it was necessary to increase the area of the structure maintaining the same floor level of the existing shed. To create the plateau respecting the permanent preservation areas in the surroundings, it was necessary to implement a retaining wall with an almost vertical face and with heights ranging from 6 to 34 meters. The work presents the conception of the job, the geotechnical investigations for the foundation of the wall and for the control of the materials for the compacted fill, details of the design and the construction. Stability analysis and instrumentation of the wall through displacement measurements at 10 points on the face are presented.

KEYWORDS: Retaining wall, Reinforced soil, Geosynthetic, Geogrid

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.



1 Introdução

Para a obra de ampliação de um centro logístico de grandes dimensões na cidade de Cajamar – SP foram necessários grandes movimentos de terra e a criação de um muro de contenção em aterro com comprimento de 180 metros e altura variável até o máximo de 34 metros totalizando 3.500 metros quadrados de face. A técnica adotada foi a construção de um aterro reforçado com geogrelhas e a face em tela eletrosoldada galvanizada preenchida com rachão no Sistema Quadratum. Este trabalho apresenta a concepção do projeto, as investigações geotécnicas de campo e laboratório realizadas, os solos utilizados para o aterro e o dimensionamento da estrutura desde os trabalhos de melhoria da fundação, drenagem, execução do aterro reforçado propriamente dito e o monitoramento de deslocamentos da face realizado.

A Figura 1 apresenta o projeto de implantação da expansão do galpão logístico. A expansão tem 90 metros de largura por 240 metros de profundidade e é em estrutura pré-moldada mista de concreto e metálica com altura de 25 metros e piso estrutural dimensionado para carga de utilização de 60 kN/m² apoiado diretamente no aterro executado. Na parte externa do galpão é prevista a região das docas e manobra de caminhões com largura de aproximadamente 20 metros e sobrecarga de utilização de 25 kN/m², diretamente sobre o trecho do muro em solo reforçado.

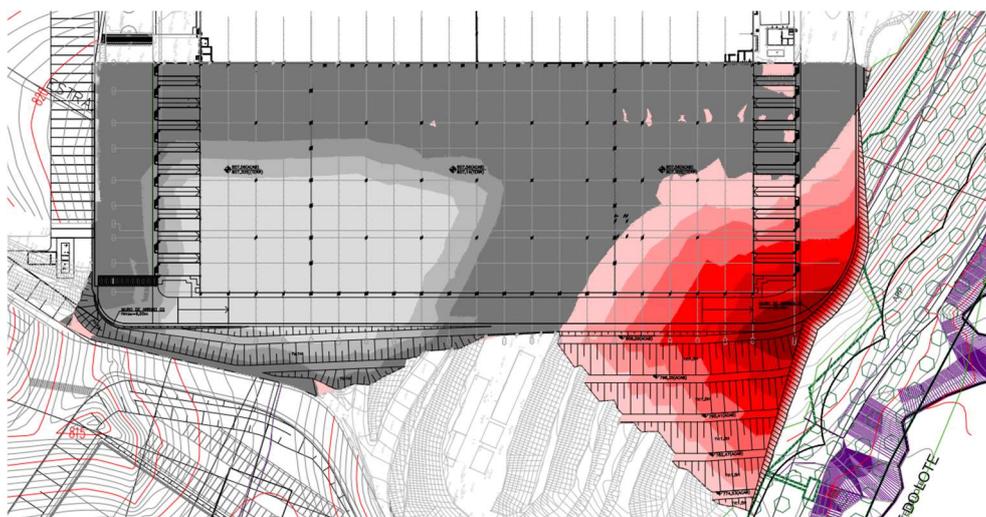


Figura 1 – Planta do projeto de expansão com zonas de corte (cinza) e aterro (vermelho) com a posição do muro limitando a zona de aterro para proteção da área de preservação permanente à direita da área de implantação.

2 Aspectos de geologia e geotecnia do local – Investigações de campo e de laboratório

As investigações para o projeto de implantação do aterro e do muro iniciaram por um parecer de geologia (Bartorelli, 2021) seguido de sondagens a percussão tipo SPT e por fim a abertura de poços para a retirada de blocos indeformados do solo de fundação do muro e a coleta de amostras deformadas dos solos previstos para o aterro. As Figuras 2 e 3 apresentam o perfil estratigráfico do solo na base do muro observado nas aberturas de poços para coleta de blocos indeformados e também na escavação inicial para a execução da base do muro. A Figura 4 apresenta em planta a posição da face do muro (base e topo) e da projeção prevista para as geogrelhas, juntamente com a locação das sondagens a percussão e retirada de blocos indeformados. A figura apresenta ainda as seções S1 a S17 que compõe o projeto. As seções S6

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.



e S10 são as de maior altura e as mais representativas para fins deste trabalho e também onde são apresentados os resultados das medidas de deslocamento da face para diversas alturas.

Foram executadas ao todo aproximadamente vinte sondagens a percussão na área do muro e do aterro, além da retirada de seis blocos indeformados na região da fundação do muro e quatro coletas de amostras deformadas do solo previsto para o aterro, que foi escavado na própria obra nas regiões onde eram previstos cortes para a implantação da expansão do galpão.



Figuras 2 e 3 – Abertura de poços para retirada de blocos indeformados e vista da escavação inicial da fundação do muro.

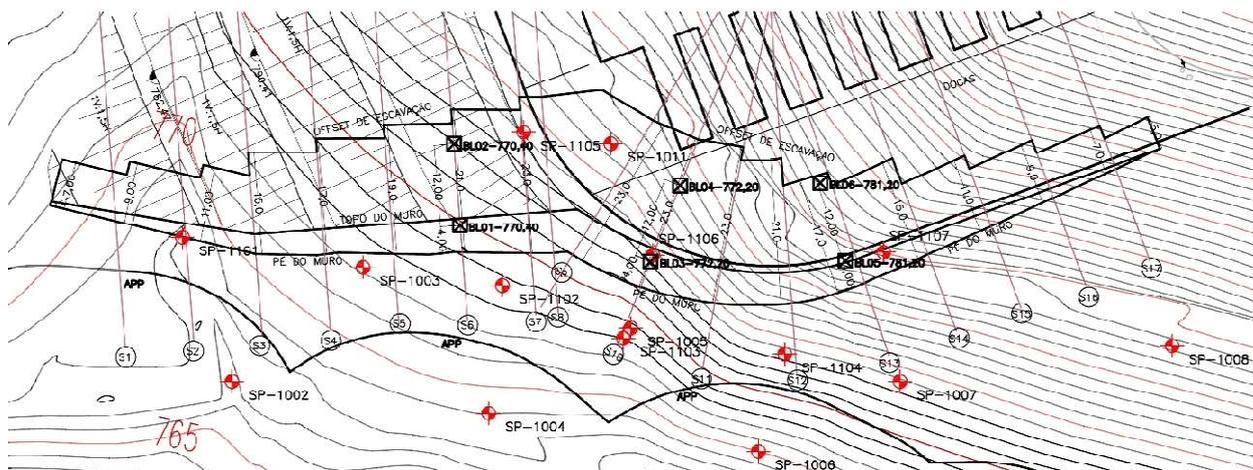


Figura 4 - Planta com a posição da face do muro (base e topo) e da projeção prevista para as geogrelhas juntamente com a locação das sondagens SPT e retirada de blocos indeformados. A figura apresenta ainda as seções S1 a S17 que compõe o projeto

Segundo Bartorelli (2021) “Na área da obra de ampliação do aterro, as escavações executadas expõem solo de alteração de metapelitos (ritmitos amarelados e arroxeados) da



Formação Estrada dos Romeiros. Os ritmitos são constituídos por alternância de delgadas camadas de metassiltitos amarelados e de metargilitos arroxeados escuros, ambas decompostas sob a forma de rocha alterada. As duas unidades não apresentam mica e tampouco sericita na sua composição, não apresentando o brilho sedoso característico pela presença desses minerais. A foliação, que coincide com o acamamento, mostra altos ângulos de mergulho, variando de 65 graus para NW a verticais, no sentido ortogonal ou ao interior do maciço, de modo a não representar descontinuidade desfavorável à estabilidade do talude de corte. A orientação dos planos de foliação é bastante constante, num intervalo de N50/NW a N90/N. O maciço apresenta planos de fratura (diaclases) descontínuos e esparsos, que também não devem interferir na estabilidade do talude, a não ser quando associados aos planos de foliação e acamamento, onde podem ocorrer limitadas cunhas de deslizamento. As características geotécnicas dos estratos siltíticos e argilíticos são distintas, uma vez que os metassiltitos apresentam coesão mais baixa e ângulo de atrito mais alto, enquanto que o contrário se dá com os metargilitos. Tendo em vista a alta inclinação do contato do aterro com os metapelitos decompostos (impermeáveis) da fundação, é recomendável o controle de água de infiltração, que poderá contribuir para a instabilidade em alguns locais.”

As sondagens à percussão e os poços indicam a presença de solos residuais maduros na região da fundação com espessura de 1 a 3 metros assentes sobre solos residuais jovens e rocha alterada compatível com a descrição da geologia. Ao longo de um trecho da fundação, existe uma camada de solo mais argiloso claro composto basicamente por caulinita com compacidade média e pouco permeável. Pela espessura da camada ser pequena e a grande responsabilidade da fundação de um muro desta altura, optou-se pela escavação de toda esta camada até a rocha alterada existente, sendo necessária uma escavação de 3 a 5 metros. Ensaio de cisalhamento direto e triaxiais drenados realizados em blocos indeformados da fundação resultaram em parâmetros de resistência bastante variáveis, uma vez que o solo residual é composto por veios mais arenosos e mais argilosos alternados. Entretanto, de modo geral, o solo de fundação tem coesão sempre acima de 50 kPa e ângulo de atrito acima de 32° nos ensaios de laboratório.

Para aterro compactado, foram utilizados os solos provenientes de escavações no próprio local da obra, que são similares aos encontrados na fundação dos muros, que foram escavados e recompactados para o aterro. São solos finos siltosos e argilosos pouco plásticos com percentuais em peso passando na peneira #200 variando entre 50 até 80%, mas com Índice de Plasticidade inferior a 10% em todos os ensaios. Quando compactados na umidade ótima, alta resistência e rigidez, com coesão variando entre 30 e 50 kPa associada a ângulo de atrito variando entre 30 e 35 graus, respectivamente.

3 Análises de estabilidade

A partir dos resultados das investigações de campo e laboratório, foi elaborado o modelo geotécnico com a estratigrafia de tipos e parâmetros de solo conforme apresentado abaixo:

- Aterro que compõe o solo reforçado, compactado com desvio em relação à umidade ótima entre -3% (ramo seco) e +1% (ramo úmido) e grau de compactação mínimo de 98% do ensaio Proctor normal. O solo utilizado para o aterro foi o solo proveniente das escavações realizadas no próprio empreendimento. É um solo residual siltoso e arenoso com percentual de finos passando na peneira #200 variando entre 40 e 60%. O solo é pouco plástico com IP abaixo de 15% nas amostras ensaiadas e com alta resistência quando compactado na umidade ótima.

$$\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$$

$$c = 20 \text{ kPa}$$

$$\phi = 30^\circ$$

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.



- Solo existente lançado na encosta que foi escavado e retrabalhado com desvio de umidade de $\pm 3\%$ e grau de compactação mínimo de 93% do ensaio Proctor normal. Este material foi utilizado apenas para o preenchimento da região a montante do muro, além do comprimento dos reforços :

$$\gamma = 17 \text{ kN/m}^3 \quad c = 10 \text{ kPa} \quad \phi = 28^\circ$$

- Solo natural superficial dos taludes existentes e camada de argila cinza clara:

$$\gamma = 17 \text{ kN/m}^3 \quad c = 15 \text{ kPa} \quad \phi = 28^\circ$$

- Solo residual duro Nspt acima de 12 golpes – Fundação dos muros:

$$\gamma = 18 \text{ kN/m}^3 \quad c = 40 \text{ kPa} \quad \phi = 30^\circ$$

- Rocha alterada Nspt acima de 25 golpes – Fundação dos muros:

$$\gamma = 18 \text{ kN/m}^3 \quad c = 60 \text{ kPa} \quad \phi = 32^\circ$$

- Rachão – Material de substituição para a fundação dos muros onde necessário:

$$\gamma = 18 \text{ kN/m}^3 \quad c = 0 \text{ kPa} \quad \phi = 42^\circ$$

O dimensionamento global foi feito através de análises de equilíbrio limite para todas as seções e faixas de altura, considerando etapas construtivas e carregamentos externos. O dimensionamento para cada seção consiste em otimizar a resistência e o comprimento das geogrelhas de modo a se obter uma distribuição de resistência uniforme entre as diversas seções e comprimentos compatíveis com as faixas de altura. O dimensionamento, detalhamento e cuidados na execução seguem as indicações da norma ABNT NBR 16920-1 Muros e taludes em solos reforçados - Parte 1: Solos reforçados em aterros. Como a obra é em cota elevada e o nível d'água está aproximadamente na cota da base do muro ou mais abaixo e foi implantado um sistema de drenagem superficial e interno do aterro bastante robusto, as análises são feitas sem a presença de pressões hidrostáticas, mas com valores de coesão minorados para considerar uma eventual perda de sucção em caso de infiltrações. A Figura 5 apresenta o resultado de uma seção transversal com altura de 34 metros. Para estas verificações, foram feitas análises pelo método de Bishop simplificado e posteriormente verificadas pelo método de Spencer. A inclinação da face do muro é 1H:5V em pano único. Foram feitas simulações com bermas intermediárias no muro, mas o ganho em termos de estabilidade é pequeno e existem complicações com a drenagem nos patamares, de modo que optou-se por uma inclinação um pouco mais suave que a usual e sem patamares intermediários. As geogrelhas utilizadas são em polímero PVA com alongamento máximo na ruptura de 5% e fator de redução global de 1,90 conforme valores certificados na época apresentados pelo fabricante. Foram utilizadas geogrelhas de PVA com alongamento máximo na ruptura de 5% para restringir os deslocamentos horizontais da estrutura, uma vez que no topo será construído um galpão com laje apoiada diretamente no solo e a área das docas com circulação de caminhões. Uma vez finalizado o dimensionamento externo e misto por equilíbrio limite é feita a verificação interna para todas as camadas de geogrelhas através do método de Ehrlich (1994), também apresentado em Vertematti (2004), que considera também os efeitos da compactação e da rigidez relativa solo-reforço. Nesta situação nenhuma geogrelha deve ter fator de segurança inferior a 1,2 (além do fator de redução de 1,90 do material). Além disso, o fator de segurança interno médio de todas as geogrelhas deve ser superior a 1,5 pelo método de Ehrlich (1994), assim como todas as seções devem ter fator de segurança mínimo de 1,50 nas análises gerais por equilíbrio limite.

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.



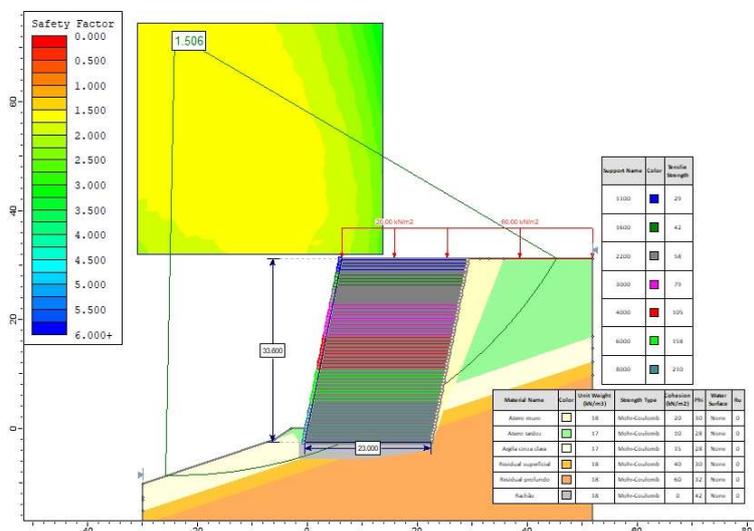


Figura 5 – Exemplo de modelo geotécnico e análise de estabilidade por equilíbrio limite para uma seção com 34 metros de altura. Observa-se a resistência das geogrelhas crescente com a profundidade e comprimento de 23 metros.

4 Aspectos da fundação do muro, drenagem interna e detalhamento

A necessidade de escavação de camadas menos resistentes na fundação e a grande área do aterro implicaram em um cuidado especial com a drenagem da base do aterro, da base do muro e também da face do muro, uma vez que para esta grande altura a precipitação superficial e um eventual escorrimento pela face podem provocar erosões localizadas. Optou-se pela criação de um grande tapete drenante na base de todo o aterro no tardo do muro, composto por uma camada de 60 cm de pedrisco. Esta camada está ligada ao dreno de base do muro composto por uma camada de rachão com 1,5 a 2 metros de espessura com uma camada de brita no topo para separação do material do aterro. Para receber o eventual fluxo do tardo, da base do muro e também da face, foi detalhado junto à base do muro enterrado um dreno de pé composto por quatro tubos-dreno de diâmetro 100 mm envoltos em brita e geotêxtil. Este dreno recebe as águas de todos os possíveis pontos de infiltração e está ligado a dois poços localizados nas cotas mais inferiores, que por sua vez drenam as águas até o talvegue através de drenos licenciados na área de proteção ambiental. Durante todo o tempo de obra e pós-obra a drenagem foi extremamente eficiente, mesmo em períodos de chuvas. Na plataforma de trabalho, as águas superficiais escorriam para o dreno de contorno e saíam pelos poços em minutos.

A Figura 6 apresenta o detalhamento do muro em planta com a indicação dos pontos para locação da base e do topo do muro e também a paginação das geogrelhas ao longo de todo o muro. A especificação das geogrelhas e o comprimento em cada trecho e cada cota são definidos em forma de tabela em função das seções S1 a S17, não apresentadas aqui por questão de espaço. A Figura 7 apresenta a elevação do muro com a geometria da face, camada drenante na fundação, cotas e pontos onde foi feito o acompanhamento dos deslocamentos da face por topografia nas seções S6, S10 e S13, tipicamente em 5 pontos para cada vertical. Por fim, a Figura 8 apresenta o detalhamento do dreno de base e de pé do muro.

Aponte a câmera do seu smartphone para o QR Code ao lado e salve o evento na sua agenda.



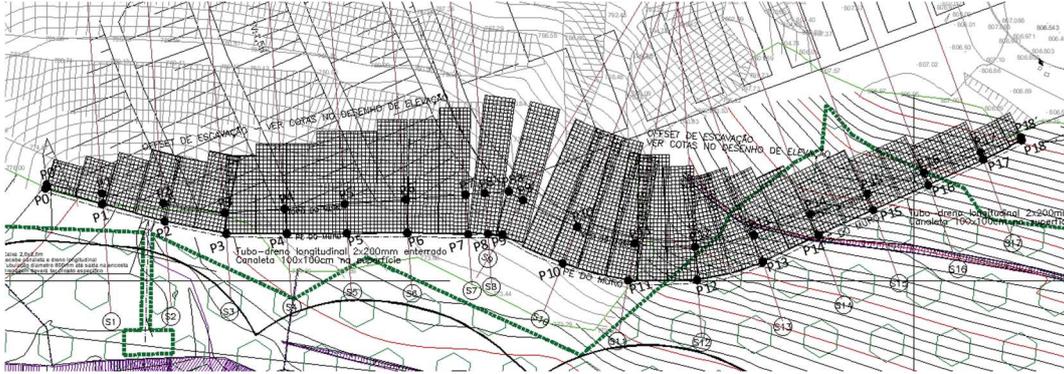


Figura 6 – Detalhamento em planta com pontos de localização e projeção das geogrelhas.

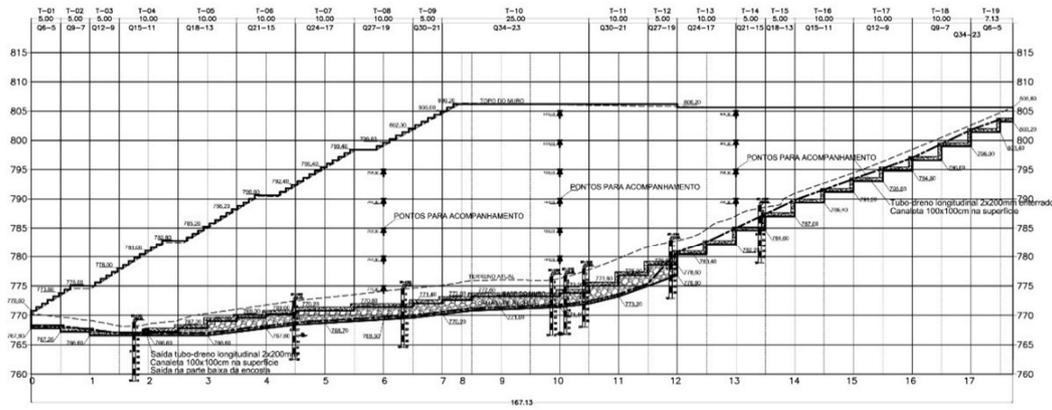


Figura 7 – Elevação do muro com geometria, cotas, dreno de base e pontos de acompanhamento topográfico dos deslocamentos da face.

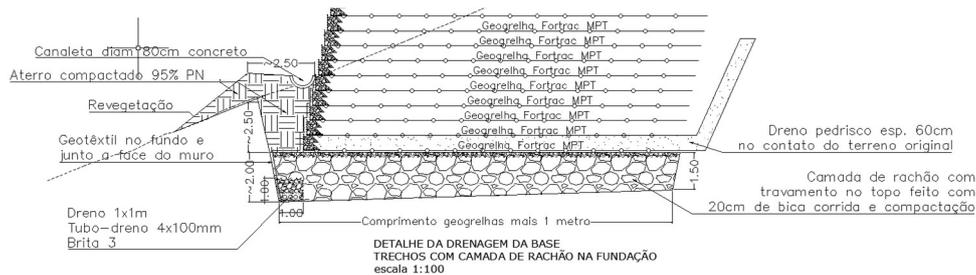


Figura 8 – Detalhe do dreno de base e de pé do muro com tubos-dreno que são ligados a poços nos pontos de cota mais baixas.

6 Aspectos construtivos

O aterro e o muro foram construídos entre agosto de 2021 e maio de 2022, incluindo períodos de chuvas intensas no verão. O maior desafio foi a organização da obra na fase inicial onde as escavações foram bastante profundas e em espaço restrito com dificuldade de acesso. A montagem do muro em si, que inclui a montagem da face com o preenchimento com rachão e a instalação das geogrelhas, foi sempre feito de forma rápida, permitindo a execução de três

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.





sefe 10

camadas de aterro de 20 cm por dia de trabalho, em duas ou três plataformas de trabalho alternadas. As Figuras 8 a 13 mostram detalhes da obra em diferentes etapas.



Figuras 8 e 9 – Fase inicial da obra com as escavações da fundação e detalhe do dreno de base.



Figura 10 – Fase intermediária da obra com instalação de geogrelhas e espalhamento de aterro.
Figura 11 – Detalhe da montagem da face.



Figuras 12 e 13 – Fase final da obra com vista da face e vista de drone da obra finalizada.

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.



7 Monitoramento de deslocamentos da face

A obra significou um grande desafio pelas suas dimensões e pela presença de uma grande estrutura no topo do aterro que tinha os pilares apoiados em estacas escavadas com trado mecânico e o piso estrutural com carga de 60 kN/m^2 apoiado diretamente no aterro. O projeto foi muito focado nas análises do estado limite de serviço. Para restringir recalques e deslocamentos horizontais do maciço foram tomados muitos cuidados com o controle de compactação, a utilização de geogrelhas mais rígidas e menos suscetíveis a fenômeno de fluência que as convencionais e um robusto sistema de drenagem interna e de superfície. O acompanhamento dos deslocamentos da face ao longo da construção do aterro e do muro e após a sua finalização foi feito através da instalação de pontos de medição por topografia na face do muro. Estes pontos foram instalados em três verticais em espaçamentos de tipicamente 5 metros na vertical. Os pontos foram sendo instalados à medida que o muro foi sendo construído, o que implica em tempos de início de medição diferentes para cada ponto, dificultando a interpretação dos resultados.

A Figura 14 apresenta a evolução das camadas de aterro do muro com o tempo. Foram ao todo 66 camadas de 0,60 cm entre o ponto de cota mais baixo +766,00 e o ponto de cota mais alto +805,60, totalizando um desnível total de 39,6 metros. Como o ponto de cota mais baixa e mais alta não coincidem na mesma vertical, a altura máxima do muro em uma vertical é de 34 metros. A Figura 14 indica que a execução seguiu de forma aproximadamente contínua ao longo de 8 meses, com uma média de 8,5 camadas de aterro (5 metros de altura) por mês. Observa-se inclusive que nos meses chuvosos de janeiro e fevereiro de 2022 a evolução da obra diminuiu um pouco, recuperando em final de fevereiro.

As Figuras 16 e 17 apresentam os deslocamentos medidos em dois pontos como exemplo. O ponto 6A está na vertical 6 na cota mais inferior (+775) e o ponto 6C está na cota +788), sendo de 13 metros a diferença entre eles. Os gráficos apresentam os deslocamentos nas direções horizontal Norte e Leste e o recalque na direção vertical. A grosso modo pode-se inferir que o ponto 6A mede o recalque da parte inferior e da fundação do muro, enquanto o ponto 6C mede o recalque da fundação mais o recalque do próprio muro em aterro à medida que vai sendo construído. De forma simplificada observa-se que:

1. Os deslocamentos aparentemente são grandes, com deslocamentos horizontais de 30 cm e recalques de até 50 cm no ponto 6C. Mas considerando a altura do muro, eles estão dentro da faixa usual de valores de deslocamento horizontal de 1% da altura e recalque de 2%. Há que se considerar que estes deslocamentos acontecem durante a obra e, como a execução da face do muro é locada por topografia em todas as camadas, a posição e a cota vão sendo corrigidas à medida que o muro é executado, de forma que, no final, a posição da crista do muro é exatamente a posição de projeto, restando apenas os deslocamentos pós-constructivos para serem acompanhados fora do layout de projeto.
2. A obra foi finalizada em meados de maio de 2022 e os deslocamentos estabilizaram logo em seguida, sendo os deslocamentos e recalques residuais a partir de junho de 2022 muito pequenos, mesmo no período de chuvas nos meses de janeiro e fevereiro de 2023.
3. A finalização do galpão e seu início da operação no mês de outubro de 2022 não provocaram novos deslocamentos e não surgiram anomalias na estrutura, no piso interno ou no piso externo, comprovando o bom desempenho da estrutura. As medições estão programadas para seguirem por mais alguns anos para possibilitar a avaliação em longo prazo.

Os resultados da instrumentação corroboram as premissas do dimensionamento de que o muro deforma algumas dezenas de centímetros na construção, mas é uma estrutura bastante rígida ao final da obra e em longo tempo.

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.



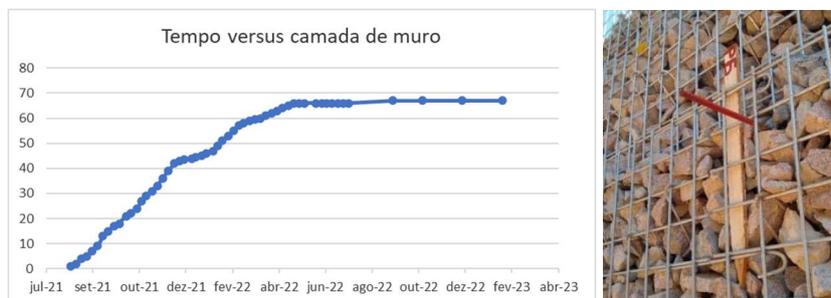
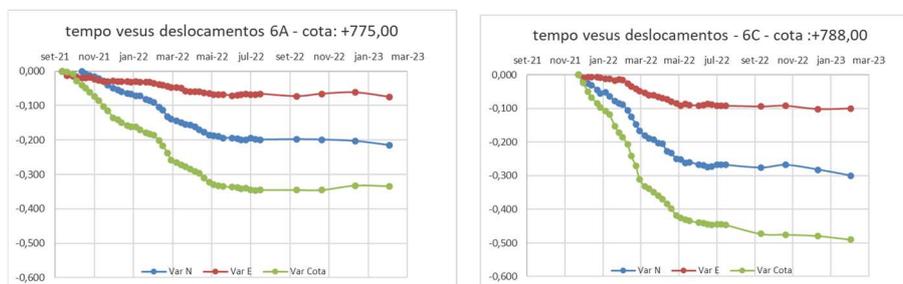


Figura 14 – Evolução da altura do muro em camadas de 0,60m (cota +766,00 a +805,60).
Figura 15 – Detalhe do ponto de acompanhamento dos deslocamentos da face por topografia.



Figuras 16 e 17 - Evolução dos deslocamentos horizontais (Norte e Leste) e recalque. Vertical S6 pontos 6A e 6C nas cotas +775 e +788.

8 Resultados e conclusões

O trabalho apresenta um caso de obra de muro de contenção de grande altura em solo reforçado com geogrelhas de PVA e face em tela eletrosoldada preenchida com rachão. São apresentados os resultados das investigações geotécnicas, dimensionamento, detalhes construtivos e resultados de medição de deslocamentos. Conclui-se que a técnica é adequada e os resultados em termos de estabilidade e deslocamentos estão dentro das previsões e dos limites de segurança e estado de serviço necessários. A utilização de solos finos pouco plásticos com compactação muito bem controlada e a utilização de geogrelhas bastante rígidas resulta em um maciço que apresenta pequenas deformações durante o período construtivo, mas as deformações pós-construção são praticamente nulas, permitindo inclusive a sua utilização como aterro de suporte para pisos estruturais pesados e áreas de circulação de caminhões.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16920-1: Muros e taludes em solos reforçados - Parte 1: Solos reforçados em aterros. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.
- Bartorelli, A. (2021) Leroy Merlin Obras de Ampliação de aterro Parecer sobre as condições geológicas da fundação. *Relatório técnico*, São Paulo – SP
- Ehrlich, M. and Mitchel, J. K. (1994) Working Stress Design Method For Reinforced Soil Walls. *Journal of Geotechnical Engineering. ASCE*, Vol 120, No. 4, pp. 625-647.
- Vertematti, J.C. 2004 *Manual Brasileiro de Geossintéticos*, Editora Edgard Blücher, São Paulo, 411 p.

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.

