

Uso de contenção em solo reforçado com geossintéticos para estabilização de barragem alteada a montante

Use of reinforced soil wall with geosynthetics for stabilization of upstream raised dam

Michel Fontes; Giovana Oliveira & Raphael Carmo

Departamento de Projetos (Engenheiros), Fontes Geotécnica, Brasil, michel@fontesgeotecnica.com

Wesley Carvalho; Dalliane Guedes

Departamento de Projetos (Engenheiros), VALE, Brasil

RESUMO: A utilização de geossintéticos como alternativa de tecnologia para reforço, estabilização e impermeabilização de obras de terra têm sido amplamente empregada nos projetos de engenharia nos últimos tempos. Considerando os diversos acidentes envolvendo barragens de mineração que utilizaram o método de alteamento por montante, a descaracterização/descomissionamento destas estruturas passou a ser uma atividade com prerrogativa legal. Neste contexto, o artigo apresentará um estudo de caso com emprego de geogrelhas em aterro de reforço para estabilização de barragem alteada a montante. As exigências estabelecidas nas normativas brasileiras condicionam a necessidade de implantação de estruturas de reforço/estabilização antes do início da descaracterização das barragens para as estruturas com fator de segurança abaixo do mínimo recomendado em norma. Sendo assim, o artigo apresentará o estudo de implantação de um muro reforçado com geogrelha de forma a garantir a estabilização efetiva da estrutura principal, cuja proposta será resumida na demonstração da viabilidade técnica da solução supracitada por meio das análises de equilíbrio limite e tensão deformação, além da metodologia de Jewell (1991) para dimensionamento dos elementos de reforço. Para os estudos, foram consideradas investigações geológico-geotécnicas dos materiais constituintes da barragem, obtidas por meio de ensaios de campo e de laboratório que permitiram a identificação dos materiais constituintes do aterro bem como dos litotipos de fundação. A caracterização dos materiais e estimativa dos parâmetros de resistência drenada e não drenada que subsidiaram as análises também foram definidos por meio de ensaios de campo e laboratório, tais como sondagens SPT, CPTu e ensaios triaxiais.

PALAVRAS-CHAVE: Geossintéticos; Muro Reforçado; Estabilização; Geogrelhas.

ABSTRACT: The use of geosynthetics as a technological alternative for reinforcement, stabilization, and waterproofing of earthworks has been widely employed in engineering projects. Considering the several accidents involving mining dams that used the upstream raising method, the decharacterization of these structures has become a recurrent activity in geotechnical engineering. In this context, the article will present a case study using geosynthetics, more specifically the use of geogrids in a reinforcing fill for the stabilization of an upstream raised dam. The requirements established in Brazilian regulations condition the need for the implementation of reinforcement structures before the start of the decharacterization of the dams for structures with a safety factor below the normative. Therefore, the article will present the implementation study of a reinforced wall using geogrids to ensure the effective stabilization of the structure, whose proposal will be summarized in demonstrating the technical feasibility of the aforementioned solution through limit equilibrium and stress-strain analyses, in addition to Jewell's methodology (1991) for dimensioning the reinforcement elements. For the studies, geological-geotechnical investigations of the materials constituting the dam were considered, obtained through field and laboratory tests that allowed the identification of the materials composing the fill, as well as the foundation lithotypes. The characterization of the materials and the estimation of drained and undrained strength parameters that supported the analyses were also defined through field and laboratory tests, such as Standard Penetration Tests (SPT), Cone Penetration Tests with pore pressure measurement (CPTu), and triaxial tests.

KEYWORDS: Geosynthetics; Reinforced Wall; Stabilization; Geogrids.

1 INTRODUÇÃO

As atividades minerárias têm ganhado grandes destaques nos últimos anos, principalmente após o rompimento das barragens ocorridos em 2015 (barragem de Fundão, em Mariana) e 2019 (mina Córrego do Feijão, em Brumadinho). Apesar dos benefícios gerados pela atividade minerária, deve-se levar em consideração os possíveis impactos ambientais que são observados desde a fase de

planejamento, operação, até possíveis rompimentos (PINTO, 2018).

Com base nisso, as normas e resoluções se adequaram à premissa de manter as obras de mineração em segurança. Para tanto, alternativas para estabilização e reforço das barragens alteadas a montante tem sido estudada objetivando o incremento de segurança para a estrutura.

Uma das soluções que tem sido amplamente utilizadas são as técnicas de solo reforçado, difundidas em meados de 1970, com o

desenvolvimento dos geossintéticos, por se tratar de uma técnica de fácil execução e baixo custo (RUIZ et.al., 2018). Além disso, com o passar dos anos, houve uma grande difusão das técnicas de execução, pesquisa e comportamento dos geossintéticos que facilitam a execução de obras em solo reforçado, que possibilitaram a utilização de materiais em locais de difícil acesso e barragens em risco de rompimento, inclusive para estruturas susceptíveis à liquefação. (ANANIAS et.al, 2013).

Desse modo, propõe-se uma alternativa para reforço de uma barragem alteada a montante, com material de rejeito e fundação com susceptibilidade à liquefação que apresenta fatores de segurança abaixo do que é exigido atualmente pelas normas brasileiras. A solução prevê, portanto, para fins de estabilização da estrutura, a construção de um muro de solo reforçado com geogrelha, estacas cravadas no pé da estrutura visando reforçar a fundação interceptando superfícies de ruptura e escavação do maciço/reservatório da estrutura.

O modelo geológico-geotécnico da estrutura foi desenvolvido tomando como referência as investigações geológico-geotécnicas dos materiais constituintes da barragem por meio de ensaios de campo e de laboratório para definição, tanto do zoneamento dos domínios de rejeito e fundação, quanto para a caracterização dos materiais e estimativa dos parâmetros de resistência drenada e não drenada.

2 CONTEXTUALIZAÇÃO

Este estudo é baseado em um caso real de uma barragem de rejeitos de mineração, originalmente concebida como uma pilha de disposição hidráulica. No entanto, a estrutura está assentada sobre solo mole de baixa resistência (colúvio), resultando em consideráveis recalques no maciço e na fundação, o que levou à sua instabilidade e ao iminente risco de ruptura. Segundo Ehrlich et al. (2018), a associação do solo com materiais de reforço pode melhorar as características mecânicas do composto. Além disso, estudos como os de Brugger et al. (2005) e Gomes et al. (2021) destacam o muro reforçado com geogrelha como uma solução prática e economicamente viável para casos de instabilidade.

Diante disso, para abordar essa questão, é proposta a implementação de um reforço na estrutura da barragem visando corrigir os recalques, optando por uma solução que envolve a construção de um muro reforçado com geogrelha.

2.1 Condição da estrutura

O estudo da estrutura em questão incluiu um zoneamento geológico o das camadas de rejeito e fundação, realizado por meio de sondagens de campo. Posteriormente, os parâmetros de resistência foram determinados através de uma série de ensaios, incluindo CPTU (Cone Penetration Test) e ensaios triaxiais. É importante destacar que o maciço da barragem compreende três tipos distintos de rejeito, categorizados como domínio I, II e III, enquanto a fundação é constituída por material mole, conhecido como colúvio. Estes elementos são os principais contribuintes para a instabilidade observada na estrutura. A seguir, a Tabela 1 apresenta os parâmetros de resistência drenada e a Tabela 2 exhibe os parâmetros de resistência não drenada de pico que serão embasados neste estudo.

Tabela 1. Parâmetros drenados efetivos adotados

| Material | γ (kN/m ³) | c' (kN/m ²) | ϕ' (°) |
|----------------------------|-------------------------------|---------------------------|-------------|
| Domínio I | 21 | 0 | 25,1 |
| Domínio II | 23 | 0 | 29,7 |
| Domínio III | 21 | 0 | 33 |
| Colúvio | 21 | 0 | 33,1 |
| Aluvião | 21 | 0 | 27 |
| Laterita (Conglomerado) | 20 | 5 | 35 |
| Aterro | 18 | 5 | 27 |
| Canga | 20 | 8 | 35 |
| Solo residual de Filito | 20 | 9 | 26 |
| Saprolito de Filito | 20 | 30 | 27 |
| Solo residual de Quartzo | 20 | 14 | 35 |
| Saprolito de Quartzo | 22 | 43 | 45 |
| Solo residual de Itabirito | 22 | 15 | 30 |
| Saprolito de Itabirito | 23,8 | 20 | 39 |

Tabela 2. Parâmetros não drenados de pico adotados

| Material | S_u/σ'_v (Pico) |
|-------------|------------------------|
| Domínio I | 0,19 |
| Domínio II | 0,24 |
| Domínio III | 0,25 |
| Colúvio | 0,26 |
| Aluvião | 0,20 |

Definidos os parâmetros de resistência através dos ensaios e estudos prévios disponíveis na estrutura, foram realizadas análises de estabilidade da condição atual e da condição futura (implantação do reforço) da estrutura. O cenário de análise foi realizado conforme resolução ANM nº95 (2022) e está detalhado na Tabela 3.

Tabela 3. Análises e FS mínimos admitidos

| Análise | Tipo | FS Mínimo | Referência |
|-------------|----------|-----------|--------------|
| Não drenada | Estática | 1,50 | Resolução 95 |

As análises de estabilidade foram realizadas por meio do software Slide2, desenvolvido pela Rocscience, adotando-se o critério de ruptura circular e não circular de Mohr-Coulomb e a teoria do equilíbrio limite pelo Método de GLE/Morgenstern-Price e/ou Spencer. A Figura 1 ilustra a condição atual da estrutura para condição não drenada estática (FS 1,11).

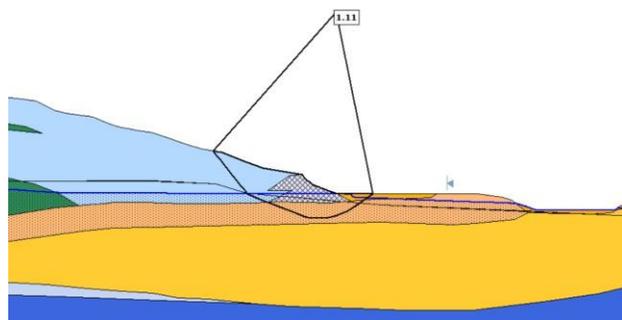


Figura 1. Condição atual, análise estática não drenada

2.2 Proposta de Estabilização

A construção do aterro em solo reforçado com geogrelhas proposto para ser utilizado como berma de estabilização para incremento do fator de segurança constitui-se por aterro executado com material principalmente granular, intercalados com camadas de geogrelhas com as resistências definidas em projeto, espaçadas verticalmente com distância conforme propõe cada alternativa de reforço. Além disso, vale destacar que devido a ação das geogrelhas, torna-se possível soluções com taludes íngremes.

As geogrelhas possuem formato de grelha com função de distribuição dos esforços constituindo dessa forma um elemento de reforço. As aberturas possibilitam interação com o meio em que estão dispostas. Além disso, é importante destacar que seus elementos são resistentes à tração.

Como a estrutura apresenta problema com fundação em solo mole, caso esse muro reforçado com geogrelha seja disposto apenas sobre a fundação, poderá ocorrer problemas de recalque devido à baixa capacidade de suporte da fundação. Para isso, primeira etapa do reforço envolve a melhoria da capacidade de carga da fundação para ancoragem e recebimento do muro sobre solo mole, evitando possíveis recalques.

O tratamento da fundação inclui a escavação no terreno natural, com profundidade variável conforme a altura do muro, e a utilização de geogrelhas para melhoria da capacidade de suporte da fundação. Estas geogrelhas devem ser preenchidas com enrocamento para garantir a aderência e suporte necessários. Além disso, foi proposta a cravação de estacas metálicas ao pé da estrutura, indicadas para ter um espaçamento de 10 cm entre estacas, para incremento de segurança, assegurando a intercepção de superfícies de ruptura predominantes na fundação.

A Figura 2 apresenta a geometria do muro proposto para a estabilização da estrutura.

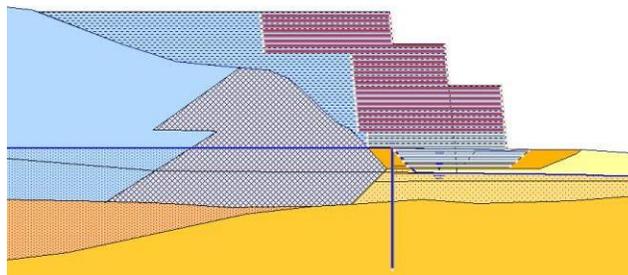


Figura 2. Geometria e característica do reforço proposto

3 METODOLOGIAS DE ANÁLISE

Nos muros reforçados, a inclusão de geossintéticos como elemento de reforço propicia a redistribuição global das tensões e deformações. De acordo com o Manual Brasileiro de Geossintéticos (MBG, 2015), essa redistribuição permite a adoção de muros com face vertical, garantida pelos mecanismos de interação solo-reforço.

A escolha da geogrelha para o reforço desse muro reforçado se dá devido a elevada capacidade do geossintético de receber solicitações de tração e resistir às tensões confinantes impostas pelo solo subjacente. Deve-se estabelecer critérios de redução da resistência nominal da geogrelha para integrar as imprecisões advindas do processo de instalação e às solicitações do meio ambiente (KOERNER, 1998).

A utilização do muro em solo reforçado com geogrelhas proposto para ser utilizado como berma de estabilização para incremento do fator de segurança deste estudo consiste na execução de um aterro executado com material arenoso, intercalados com camadas de geogrelhas de poliéster.

O sistema de contenção aplicado no estudo consiste em um muro de faceamento britado com inclinação 1:10. A face é composta por telas galvanizadas soldadas, dobradas em "L" e estabilizadas com barras metálicas. Esse elemento de tela é preenchido com brita ou material granular para permitir a drenagem do fluxo. Sobre a brita é colocado um geotêxtil para separação entre a brita e o aterro que irá compor o muro.

Para conferir ao solo de fundação a devida capacidade de suporte necessária para suportar o muro, foi utilizada uma tecnologia que prevê o reforço da fundação utilizando uma geogrelha com características distintas da utilizada para o muro.

As geogrelhas para melhoramento da capacidade de suporte de estruturas de reforço são estruturas rígidas, desenvolvidas à base de polipropileno. A estrutura das geogrelhas para essa finalidade apresenta nervuras hexagonais, trapezoidais e triangulares. Nessa tecnologia, a geogrelha transmite os esforços de forma radial ao solo de fundação a partir do travamento mecânico com o material de aterro, sem resistência à tração. Além disso, ela possui grande resistência à tração, resultando em uma eficiente instalação em solos moles.

3.1. Verificação quanto à estabilidade externa

A estabilidade externa do muro reforçado é garantida pela interação entre a geogrelha e o solo de fundação. A literatura indica

que a estabilidade externa pode ser avaliada por meio de métodos analíticos ou numéricos e pode ser afetada por diversos fatores, como o ângulo de fricção do solo, a coesão do solo, a tensão na geogrelha e a distância entre as camadas de geogrelha. É importante realizar uma análise cuidadosa de todas as variáveis envolvidas para garantir a estabilidade da estrutura (DAS; KATARIA, 2019; FANNIN et al., 1995; LIU et al., 2020).

Para a verificação da estabilidade externa de um muro, é considerado o comportamento do conjunto similar ao de um muro de gravidade. Desse modo, são verificados quatro mecanismos clássicos de instabilidade: deslizamento de base, tombamento, inadequação da capacidade de carga e estabilidade global (ABNT, 2016).

3.1.1 Deslizamento de base

Para fazer a verificação de segurança contra deslizamento de base em um muro reforçado com geogrelha, é importante seguir uma série de etapas. De acordo com a ABNT NBR 15115:2018, é necessário calcular as forças atuantes no muro, incluindo as cargas permanentes e variáveis, além das forças de empuxo do solo. Em seguida, é preciso determinar a capacidade de resistência da geogrelha, levando em consideração seus atributos físicos e mecânicos, como a resistência à tração e a rigidez.

A verificação da estabilidade do muro e a análise da segurança contra o deslizamento de base pode ser realizada com base em estudos como os de Britto et al. (2016) e Schmidt et al. (2019), que utilizam o método de Bishop. Essas análises são importantes para verificar se o coeficiente de segurança contra o deslizamento de base está de acordo com as normas e padrões de segurança estabelecidos.

Além do que foi citado, é importante dimensionar o comprimento da geogrelha (L_r) através de alguns parâmetros, como o fator de segurança mínimo e o ângulo de atrito entre o solo e o material geossintético. No MBG está descrito como são feitas essas definições através das equações a seguir:

$$FS_d \geq 1,5 \quad (1)$$

$$L_r = \frac{FS_d \cdot E}{(\gamma_1 H + q) \cdot \tan \phi_1} \quad (2)$$

Sendo q a sobrecarga uniforme distribuída sobre o terrapleno, FS_d o fator de segurança contra o deslizamento, γ_1 o peso específico do solo, H a altura do maciço reforçado, ϕ_1 o ângulo de atrito entre a base do maciço reforçado e o solo de fundação e E o empuxo ativo gerado pelo muro.

3.1.2 Tombamento

Para determinar a resistência ao tombamento do muro reforçado com geogrelha, podem ser realizados ensaios de laboratório ou estudos teóricos baseados em modelos matemáticos, considerando cargas permanentes e variáveis, as forças de empuxo do solo e considerando a capacidade de transmissão de força de tração e compressão da geogrelha.

Assim como na verificação contra o deslizamento, é preciso levar em consideração parâmetros da geogrelha e um fator de

comprimento da geogrelha a ser utilizada no muro. No MBG está descrito como são feitas essas definições através das equações a seguir:

$$FS_t \geq 2,0 \quad (3)$$

$$L_r = \sqrt{\frac{2FS_t E y_e}{(\gamma_1 H + q)}} \quad (4)$$

Sendo L_r o comprimento de reforço ou largura da base de massa reforçada, FS_t o fator de segurança contra o tombamento e y_e o braço de alavanca do empuxo ativo em relação ao pé da estrutura.

3.1.3 Tensão admissível na fundação

No que diz respeito à verificação da segurança contra a ruptura do solo de fundação, faz-se necessário a verificação das deformações excessivas que o terreno de fundação será submetido. A resultante das tensões atuantes na base do solo reforçado deve garantir que toda a base esteja submetida apenas a esforços de compressão. Para isso, a excentricidade gerada deve ser inferior a sexta parte de L_r , conforme indica a equação a seguir:

$$e = \frac{Ka_3(1+3\gamma_3 h)}{6\left(\frac{\gamma_1}{\gamma_3} + \frac{q}{\gamma_3 h}\right)} * \left(\frac{H^2}{L_r}\right) \leq \left(\frac{L_r}{6}\right) \quad (5)$$

É importante destacar que as incógnitas com índice 3 dizem respeito aos parâmetros do solo de fundação. Já os índices 1 se referem ao solo de reforço.

A fim de garantir que não ocorra ruptura no solo de fundação, a sua capacidade de carga deve ser pelo menos três vezes maior que as tensões normais atuantes na base, conforme indica a equação a seguir:

$$FS_f = \frac{q_{m\acute{a}x}}{\sigma} \geq 3,0 \quad (6)$$

Sendo $q_{m\acute{a}x}$ a capacidade de carga do solo de fundação, em kPa, e σ a tensão normal determinada em norma para dimensionar o

Pa e σ a tensão normal atuante na base do muro, Engenharia Civil

A equação elaborada por Terzaghi e Peck (1967) auxilia na determinação da capacidade de carga do solo. A equação é detalhada abaixo:

$$q_{m\acute{a}x} = c' * Nc + qs * Nq + 0,5 * \gamma_3 * B' * Ny \quad (7)$$

Sendo c' a coesão do solo de fundação, qs a sobrecarga a nível de superfície, B' o comprimento da fundação e Nc , Nq e Ny os fatores de capacidade de carga, determinados pelas equações abaixo:

$$Nq = e^{\pi \tan \Phi'} * \tan^2(45^\circ + \Phi'/2) \quad (8)$$

$$Nc = Nq - 1 * \cotan \Phi'_3 \quad (9)$$

$$N\gamma = 1,80 * (Nq - 1) * \tan \Phi'_3 \quad (10)$$

Uma vez calculado a capacidade de carga do solo de fundação, faz-se necessário o cálculo das tensões normais na base do solo reforçado, indicado pela formulação de Meyerhoff (1955) e detalhado abaixo:

$$\sigma = \frac{3(\gamma_1 * h + q)}{3 - ka2 \left(\frac{\gamma_1 * h + 3q}{\gamma_1 * h + 3q} \right)^2 * \left(\frac{H}{L_r} \right)} \quad (11)$$

3.1.4 Segurança quanto a ruptura global

Por fim, a verificação contra a ruptura global considera o solo reforçado como elemento interno à massa do solo que se desloca com o um corpo rígido. Para o cálculo do fator de segurança pode ser utilizado qualquer método de equilíbrio limite tais como Spencer (1967) e Bishop (1955). O fator de segurança é definido pela equação

abaixo:

$$FSg = \frac{\sum Mr}{\sum Ms} \quad (12)$$

Onde $\sum Mr$ é o somatório dos momentos dos esforços de resistência. Já $\sum Ms$ retorna o somatório dos momentos dos esforços solicitantes.

3.2 Verificação quanto à estabilidade interna

Segundo o MBG, a ruptura interna de um solo reforçado pode ocorrer por duas razões, quais sejam: as solicitações impostas no reforço são superiores à carga suportada; ou quando há insuficiência na ancoragem. Nesse contexto, caracteriza-se uma ruptura progressiva dos reforços levando ao colapso da estrutura. Nos itens abaixo serão detalhados os dois tipos de verificação quanto à estabilidade interna.

3.2.1 Ruptura estrutural e arrancamento do reforço

A ruptura estrutural do reforço em um solo reforçado é um fenômeno complexo que envolve diversos fatores, como a resistência do geossintético, a resistência do solo, a geometria e as condições de instalação. Segundo o MBG, a ruptura estrutural do reforço pode ser calculada através da equação de interação solo-geossintético, que leva em conta as tensões de tração e compressão no geossintético, a resistência do solo à compressão e a geometria da seção transversal do reforço. Além disso, para garantir a segurança e a estabilidade do sistema de solo reforçado, é importante que sejam observados os critérios de dimensionamento e instalação recomendado pelo manual.

Para a verificação contra a ruptura estrutural, utilizou-se o método

e o parâmetro de poropressão (r_u) utilizado foi de 0,25, tendo em vista o processo de compactação.

O autor supracitado apresenta 3 ábacos pelos quais se torna possível a obtenção de parâmetros para verificação quanto a ruptura estrutural e arrancamento do reforço. Quanto ao espaçamento entre e as camadas horizontais de reforço, este é calculado por meio da equação a seguir:

$$s = \frac{T}{v K_d * \gamma * H_{eq}} \quad (13)$$

Sendo H_{eq} a altura equivalente do solo reforçado levando em consideração uma sobrecarga na superfície, K_d o coeficiente de empuxo para dimensionamento e por fim, T_d a resistência à tração de cálculo para o geossintético. Já o comprimento de ancoragem requerido para o reforço na base da estrutura pode ser calculado pela seguinte equação:

$$L_b = \left(\frac{T_d}{2 * \gamma * H} \right) * \left(\frac{1}{1 - r_u} \right) * \left(\frac{1}{f_b * \tan \Phi'} \right) \quad (14)$$

Sendo f_b o fator de interação solo-greogrelha e T_d a resistência à tração de cálculo para o geossintético. Por fim, o coeficiente de empuxo de cálculo do maciço é obtido por meio da seguinte equação:

$$K_d = \frac{K_{reg}}{1 - \frac{L_b}{L_r}} \quad (15)$$

modo simplificado de Jewell (1991). Neste método, admite-se que o solo, no qual o muro se apoia, apresenta resistência igual ou superior ao material utilizado no aterro do solo reforçado, considerando eventuais poropressões induzidas no aterro. Cabe mencionar que

sendo K_{red} o coeficiente de empuxo requerido e L_r o comprimento de ancoragem requerido de cálculo e L_r o comprimento do reforço de modo a atender às condições de estabilidade interna e segurança contra deslizamento. Cabe mencionar que o coeficiente de empuxo requerido será obtido pelo ábaco de Jewell (1991) em função do r_u adotado para o solo.

3.2 Análises de tensão deformação

A proposta de estabilização utiliza processos construtivos que necessitam de verificações além das análises realizadas. Desse modo, a fim de entender as tensões solicitantes e as deformações sofridas ao longo do processo construtivo da alternativa de reforço, foram feitas análises de tensão – deformação pelo método dos elementos finitos em condição não drenada utilizando o software RS2

A modelagem tensão-deformação utilizando o método de elementos finitos é realizada por etapas para considerar o processo de construção e solicitação da estrutura. A finalidade é avaliar os carregamentos e os deslocamentos em relação à condição inicial de campo a cada estágio de estudo da estrutura. No presente estudo foi considerada condição de estado plano de deformação, com tensões de campo geradas pela gravidade (field stress type: gravity, na modelagem do software) e considerando a topografia do terreno no cálculo de tensões iniciais.

Sendo assim, para essa modelagem, alguns pontos devem ser considerados. O primeiro deles é que a interação entre o solo e os materiais de reforço demandam uma representação detalhada das interfaces solo-estrutura, disponíveis no software através de liners,

sendo “Structural Interface” a representação da linha que junta as propriedades do solo à sua interação com as propriedades dos materiais de reforço. Além disso, também deve ser considerada a modelagem da base do muro, onde deve ser feito o ancoramento adequado para evitar possíveis recalques na fundação. Outro problema que pode ocorrer nas modelagens computacionais é o recalque excessivo que pode surgir devido a variações bruscas de tensão na construção do muro. Assim, a análise do muro deve ser por camadas para refletir a progressão da construção, evitando que o software calcule cargas de tensão muito elevadas por não considerar as etapas graduais de implementação.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

De posse dos dados geométricos da estrutura de reforço além dos parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo constituinte e das informações técnicas da geogrelha quanto aos fatores de redução, resistência à tração e módulo de rigidez, foi possível realizar as verificações internas e externas do muro de contenção.

No que diz respeito às verificações externas, o comprimento mínimo necessário para atender quanto aos fatores de segurança mínimos para o deslizamento e tombamento (ABNT NBR 16920) e estão detalhados na Tabela 4. É importante destacar que o critério de excentricidade foi atendido. Além disso, o fator de segurança quanto à capacidade de carga foi de 6,40, superior ao normativo (2,0 conforme ABNT NBR 16920)

Tabela 4. Verificações externas (comprimento mínimo)

| Verificação | Comprimento (m) |
|--------------|-----------------|
| Deslizamento | 5,89 |
| Tombamento | 7,64 |

No que tange às verificações internas, o método de Jewell (1991) retorna os seguintes comprimentos e espaçamentos mínimos para atendimento à instabilidade interna e deslizamento ao longo da base, detalhados na Tabela 5.

Tabela 5. Verificações internas (comprimento mínimo)

| Verificação | Comprimento (m) |
|-------------------------------|-----------------|
| Deslizamento ao longo da base | 4,80 |
| Instabilidade interna | 7,20 |
| Espaçamento vertical | 0,51 |

Nota-se que o maior comprimento mínimo obtido diz respeito à verificação do tombamento da estrutura (7,64 m). Dessa forma, será utilizado o comprimento mínimo de 8 m de forma a atender todas as verificações realizadas. Além disso, o espaçamento máximo obtido foi de 0,51, sendo utilizado 0,50 m vislumbrando facilitar os processos construtivos.

As geogrelhas de poliéster utilizadas para compor o muro reforçado apresentam resistência de 150 kN/m e 400 kN/m. As estacas metálicas apresentam diâmetro de 1200 mm espaçadas a 10 cm. A Figura 3 apresenta os detalhes do reforço.

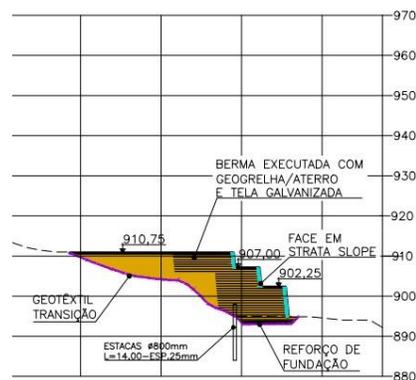


Figura 3. Detalhes da proposta de reforço

Por meio das análises de fluxo, observou-se um acréscimo de elevação da cota freática em 1 m em função da implantação da solução de reforço, sendo então a freática utilizada para as análises de estabilidade. A Figura 4 apresenta a análise por equilíbrio limite para o cenário não drenado de pico.

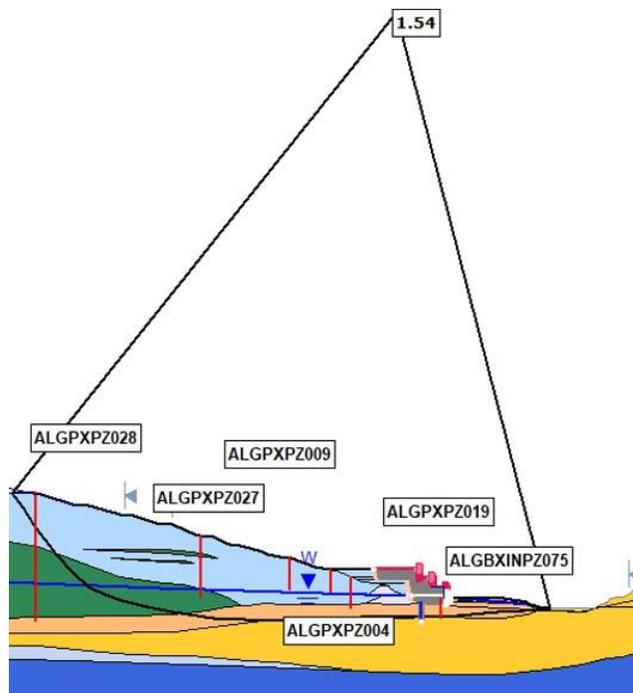


Figura 4. Condição reforçada, análise estática não drenada

Também foram feitas análises de tensão deformação utilizando o software RS2. A primeira observação que pode ser feita ao analisar os resultados é que o SRF (Strength Reduction Factor) crítico foi de 1,67. O fator crítico de redução da resistência equivale ao “fator de segurança” do talude. Portanto, entende-se que um fator de 1,67 é aceitável no ponto de vista da estrutura em análise, visto, inclusive, que é um valor aproximado ao encontrado na análise por

equilíbrio limite apresentada na Figura 4.

O primeiro parâmetro a ser analisado nos resultados das análises de tensão deformação é a máxima deformação cisalhante, que representa a maior deformação de cisalhamento que ocorre em um material ou em uma estrutura sujeita a uma carga. Na Figura 5 a seguir é apresentada a máxima deformação cisalhante a etapa mais crítica de projeto, ou seja, a condição não drenada de pico e avalia do na região do muro.

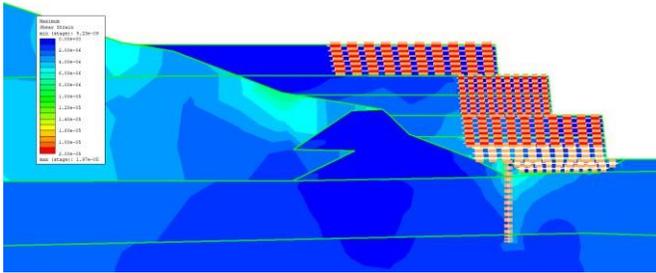


Figura 5. Máxima deformação cisalhante

Nas análises seguintes, é apresentado o deslocamento vertical da etapa crítica, onde é possível ver a reação da estrutura às tensões do muro sobre a fundação.

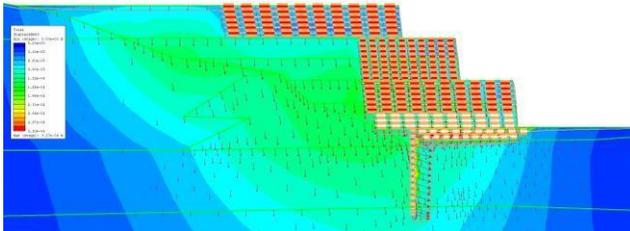


Figura 6. Deslocamentos totais

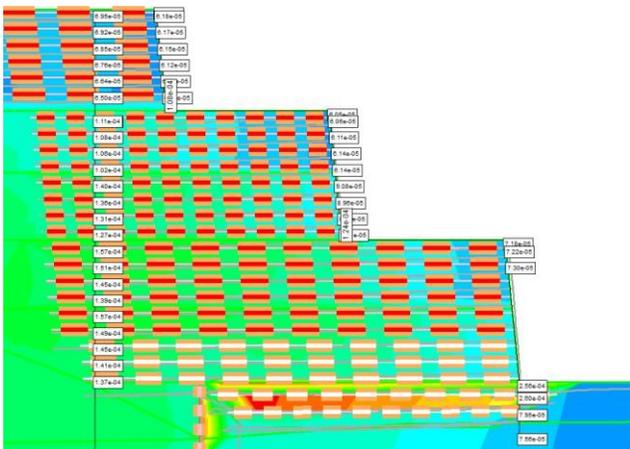


Figura 7. Deslocamentos totais

5 CONCLUSÕES

Em suma, a análise e proposta de reforço para a barragem de rejeitos de mineração enfrentam desafios significativos devido à complexidade do material do maciço, composto por diversas texturas de baixa resistência. A abordagem de reforço por meio da implementação de um muro de solo reforçado com geogrelhas e estacas metálicas na fundação busca resolver os problemas imediatos de instabilidade e riscos de ruptura decorrentes dos grandes recalques.

A sequência de construção envolve a instalação das estacas antes da escavação do tratamento de fundação do muro armado. Esse passo é essencial, pois as estacas proporcionam suporte adicional ao solo, minimizando os deslocamentos e recalques durante a escavação e garantindo que o muro possa ser construído em uma base estável. A instalação antecipada das estacas também facilita a interação adequada entre o solo e a estrutura de reforço, essencial para a eficácia da solução proposta.

No entanto, a modelagem computacional utilizando o método dos elementos finitos revela complexidades adicionais, incluindo a necessidade de representar adequadamente as diferentes propriedades dos solos, a interação solo-estrutura e a consideração das etapas graduais de construção para evitar recalques excessivos. Essas considerações são fundamentais para garantir a eficácia da solução proposta, visando não apenas corrigir os problemas atuais, mas também assegurar a estabilidade a longo prazo e a segurança da barragem.

Os resultados das análises realizadas demonstraram de forma consistente a eficácia do uso do muro reforçado com geogrelhas e estacas metálicas para o reforço da barragem de rejeitos. Observou-se uma redução significativa nos recalques, indicando que a estratégia adotada foi bem-sucedida em mitigar os problemas de instabilidade. Além disso, o correto dimensionamento do muro reforçado evidenciou-se pela aceitabilidade dos deslocamentos e deformações observados, corroborando a precisão das análises realizadas. Esses resultados positivos reforçam a validade e a eficiência da abordagem escolhida para reforçar a estrutura da barragem.

Entretanto, é importante ressaltar a necessidade contínua de monitoração e manutenção para assegurar a estabilidade a longo prazo e a segurança desta infraestrutura fundamental. Essa investigação proporcionou insights valiosos, destacando a viabilidade e efetividade do uso do muro reforçado com geogrelhas e estacas metálicas como uma solução eficaz para mitigar os problemas de recalques e garantir a estabilidade de barragens construídas em solos de baixa resistência.

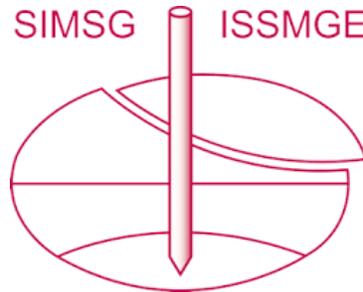
REFERÊNCIAS

- Ananias, E. J.; Teixeira, A. M.; Duran, J. S. *O uso crescente de solos reforçados para contenções em áreas urbanas: uma ênfase aos 20 anos da solução Terramesh no Brasil*. Artigo Científico. São Paulo – Jundiá. 2013
- ABNT (2004). NBR 10004: *Resíduos sólidos – Classificação*. Associação Brasileira De Normas Técnicas, Rio de Janeiro, p. 71.
- ABNT (2018). NBR 15115 - *Solo reforçado com geossintéticos - Projeto e execução*.
- Britto, Alisson et al. *Verificação da estabilidade de muros*

- reforçados com geogrelhas. In: COBRAMSEG 2005. Engineering Geology and the Environment (IAEG), La Serena Chile, 2024.
- BRUGGER, P. J. et al. Muro em solo reforçado com geogrelhas e blocos segmentais—um caso de obra com altura de 13,50 metros. In: IV Conferência Brasileira sobre Estabilidades de Encostas (COBRAE). 2005.
- DAS, Braja M.; KATARIA, Sumeet. *Reinforced soil and its engineering applications*. CRC Press, 2019.
- Fannin, Ronald J.; GRIFFITHS, D. V.; LOEW, S. *Theory and application of geosynthetic-reinforced soil structures*.

- Transportation Research Board, 1995.
- GOMES, Elton Douglas Galino et al. Dimensionamento de uma estrutura de contenção em muro reforçado com geossintético. *Research, Society and Development*, v. 10, n. 8, p. e14210817217-e14210817217, 2021.
- Ehrlich, M., et al. *Muros e Taludes Reforçados*. In: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Manual Brasileiro de Geossintéticos. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.p106-148.
- Koerner, R. M. (1998). *Designing With Geosynthetics* (4th ed.). Prentice Hall, Inc., New Jersey, USA. p.761.
- Lodi, P. C. (2003) *Aspectos de Degradação de Geomembranas Poliméricas de Polietileno de Alta Densidade (PEAD) e de Polivinilclorado (PVC)*. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 267p.
- LIU, Hanlong et al. *Effects of geogrid spacing on the stability of a geogrid-reinforced steep slope under rainfall*. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, v. 146,
- Palmeira, E. M. & Ortigão, A. (2004). *Aterros sobre solos moles*. Vertematti, J.V. (ed) Manual Brasileiro de Geossintéticos, Associação Brasileira de das Indústrias de Não tecidos e de Tecidos Técnicos, São Paulo, cap. 4.4, p. 72-96.
- Pasa, G. A. et al. *Numerical modeling of the reinforcement effect of geogrids on mechanically stabilized earth walls*. *Geotextiles and Geomembranes*, v. 47, n. 3, p. 300-310, 2019.
- Pinto, N.P. (2018). *Avaliação dos impactos ambientais e medidas mitigadoras de empreendimentos de mineração a céu aberto no Brasil*. Acessado em: 20/01/2023.
- Ritter, E.; Ehrlich, M.; Barbosa, M. C. (1998). *A sorção no transporte de contaminantes reativos em solos argilosos salinos e não-salinos*. Anais XI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (XI COBRAMSEG), ABMS, Brasília. v. 3. p. 1687 - 1694
- Ruiz, E. F.; Mota, G. M.; Forteza, A. L. *Solo reforçado com geogrelhas: Aplicações em obras de encontros de pontes e viadutos*. Disponível em: <http://igsbrasil.org.br/wpcontent/uploads/2017/12/CCO-2012-Soloreforçado-com-geogrelhas-aplicações-emobras-de-encontros-de-pontes-e-viadutos.pdf>. Acesso em: 25/01/2023.
- Schimitd, Rodrigo et al. *Análise da estabilidade de muros reforçados com geossintéticos por meio do método de Bishop*. *Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental*, v. 23, n. 2, 2019.
- Teixeira, S. H. C. , Bueno, B. S. & Zornberg, J.G. (2007). *Pullout resistance of individual longitudinal and tranverse geogrid ribs*. *Journal of Geotechnical and Enviromental Engineering*, ASCE, New York, v. 133, p. 37-50.
- Tchobanoglous, G.; Theisen, H.; Vigil, S. A. (1993). *Integrated solid waste management: Engineering principles and management issues*. McGraw-Hill, USA. p. 949.

INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:

<https://www.issmge.org/publications/online-library>

This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.

The paper was published in the proceedings of the 17th Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (XVII PCSMGE) and was edited by Gonzalo Montalva, Daniel Pollak, Claudio Roman and Luis Valenzuela. The conference was held from November 12th to November 16th 2024 in Chile.