

## Use of reinforced soil as a solution for implementation of raising a reinforcement berm in a tailing dam with access restriction

Utilização de solo reforçado como solução para implantação de para alteamento de uma berma de reforço em barragem de rejeito com restrição de acesso

**Fernando Queiroz**

*Geotechnical engineering, Fontes Geotécnica and Federal University of Minas Gerais, Belo Horizonte, Brazil, feroqueiroz@gmail.com.*

Michel Fontes, Gladys Aquino, Anderson Milagres, Raphael Carmo, Fernanda Sales & Sabrina Penasso

*Geotechnical engineering, Fontes Geotécnica, Belo Horizonte, Brazil*

**ABSTRACT:** Desde a década de 1960, o conceito de solo reforçado vem se tornando cada vez mais presente no universo da Engenharia Geotécnica. Tal conceito consiste na introdução de elementos resistentes à tração, convenientemente orientados, que aumentam a resistência do solo e diminuem a deformabilidade do maciço. Ressalta-se que esta ideia é encontrada na própria natureza, observando-se como o solo adquire resistência pela presença de raízes (fibras) inseridas ao longo de sua estrutura agindo como tensores. Baseando-se no princípio do solo reforçado e na tecnologia desenvolvida no início dos anos 60 conhecida como “terre armée” (terra armada), nasceu o Sistema Terramesh®, que consiste na introdução de elementos resistentes à tração, convenientemente orientados, que aumentam a resistência do solo e diminuem a deformabilidade do maciço. Diante disso, este trabalho remete à implantação de berma de reforço de uma Barragem de rejeito com emprego do sistema Terramesh® que requer baixa deformação na base da estrutura e em região com restrições de acesso para execução das obras.

**ABSTRACT:** Since the 1960s, the concept of reinforced soil has become increasingly present in the world of Geotechnical Engineering. This concept consists of the introduction of suitably orientated traction-resistant elements that increase the resistance of the soil and reduce the deformability of the massif. It should be noted that this idea is found in nature itself, observing how soil acquires resistance through the presence of roots (fibres) inserted throughout its structure acting as tensors. Based on the principle of reinforced soil and the technology developed in the early 1960s known as ‘terre armée’ (reinforced earth), the Terramesh® System was born, which consists of the introduction of suitably orientated tensile elements that increase the resistance of the soil and reduce the deformability of the massif. In view of this, this work refers to the implementation of a reinforcement berm for a tailings dam using the Terramesh® system, which requires low deformation at the base of the structure and in a region with access restrictions for carrying out the work.

**KEYWORDS:** Terramesh®, geosynthetics, mining, geotechnics, dam raising, soil reinforcement

### 1 INTRODUÇÃO

A técnica de reforço de solos mediante inserção de geossintéticos vem se mostrando de grande aplicação em diversos problemas e casos geotécnicos, tais como: execução de aterros sobre depósitos moles, contenção de taludes e encostas, dentre outros. Salienta-se que, de modo geral, os solos manifestam elevada resistência aos esforços de compressão, não obstante, apresentam baixa resistência às forças de tração. Quando uma massa de solo é axialmente carregada, ela sofre deformações verticais de compressão e deformações laterais de tração.

Todavia, caso essa massa esteja reforçada, os movimentos laterais são limitados e a restrição de deformações é obtida devido ao desenvolvimento de solicitações de tração nos componentes de reforço. Pode-se dizer que uma das mais famigeradas técnicas de solo reforçado compreende a introdução de elementos, convenientemente orientados, e resistentes à tração, os quais diminuem a deformabilidade do maciço e aumentam sua resistência. Essa técnica propicia melhoria no comportamento global do maciço em função da transferência de forças para elementos mais competentes.

De acordo com (Gangakhedkar, 2004), os geossintéticos são materiais poliméricos com elevada resistência à tração, sendo esta uma característica que os solos, comumente, não possuem. Os geossintéticos podem ser classificados em geotêxteis, geogrelhas,

geomantas e geodrenos e são desenvolvidos para utilização em obras geotécnicas, desempenhando funções de reforço, filtração, drenagem, proteção, separação, impermeabilização e controle de erosão superficial. Segundo (COSTA et al., 2008), estes materiais representam alternativas de fácil e rápida aplicação, caracterizando soluções sustentáveis e mais econômicas do que as tradicionais. Cabe destacar que no emprego de geossintético é utilizado, em geral, solos disponíveis no local do empreendimento, o que também constitui uma alternativa atrativa quando comparada às convencionais.

Além disso, apresenta vantagens técnicas, tais como a adoção de maciços compactados mais íngremes e com menor volume de solo, em virtude da inserção de elementos poliméricos nos aterros. Outrossim, o processo construtivo é simples, não exigindo mão de obra qualificada, tampouco equipamentos específicos. Por fim, o tempo de execução, geralmente, reduzido e menos dispendioso quando comparado ao elevado consumo de concreto usualmente empregado em tratativas como muros de gravidade se fazem de grande valia.

Diante deste contexto, o estudo em epígrafe remete ao alteamento de berma de reforço de uma barragem de rejeito com emprego do sistema Terramesh® fundamentado na tecnologia desenvolvida no início da década de 1960 conhecida como “terre armée”. Constituída por malha hexagonal de dupla torção, associado a um paramento frontal plano e inclinado em 70°, a solução descrita foi

empregada devido às restrições de acesso para execução das obras, à baixa deformação esperada na base da estrutura, além de se tratar de solução exequível em regiões com escassez de materiais granulares, cuja aplicação mostrou-se viável visto os problemas identificados.

## 2 METODOLOGIA

A avaliação da estabilidade do sistema em Terramesh®, implementado com rejeito underflow como matéria-prima, considera o comportamento da estrutura de reforço similar a de um muro de gravidade e verifica-se a segurança contra deslizamento, tombamento, ruptura do solo de fundação e ruptura do paramento frontal do sistema. A simulação numérica apresentada neste artigo foi realizada para uma seção da estrutura.

Para determinação dos fatores de segurança relacionados aos mecanismos de instabilidade supracitados é necessário que se conheça, primeiramente, o empuxo ativo que atua sobre o solo reforçado. O empuxo ativo é a força exercida pelo solo não reforçado, que atua no solo reforçado com a tendência de gerar um desequilíbrio no maciço estabilizado.

Calcula-se o empuxo ativo desenvolvido pela massa de solo não reforçado de acordo com a formulação estabelecida por Rankine (1857), supondo que a superfície de contato entre solo reforçado e não reforçado não mobilize atrito, o que implica na distribuição dos empuxos calculados para estabilidade externa atuante em sentido paralelo à superfície do terreno. A Equação (1) a seguir, estabelecida por Rankine, determina o coeficiente de empuxo ativo.

$$Ka = \tan^2(45 - \phi'_2/2) \quad (1)$$

Sendo  $\phi'_2$ : ângulo de atrito do solo não reforçado.

Conhecendo-se o peso específico do solo e a altura da estrutura, torna-se possível determinar o esforço gerado pelo empuxo ativo através da Equação (2).

$$E = \frac{1}{2} Ka * \gamma_2 * H^2 \quad (2)$$

Sendo  $\gamma_2$  = peso específico do solo não reforçado (kN/m<sup>3</sup>);  
 H = altura do muro de solo reforçado (m).

O fator de segurança contra o deslizamento é determinado pela razão entre a força resistente capaz de ser mobilizada e o empuxo ativo, apresentada na Equação (3).

$$FSd = \frac{(\gamma_1 * H + q) * Lr * \tan \phi'_1}{E} \geq 1,5 \quad (3)$$

Sendo  $\gamma_1$  = peso específico do solo reforçado (kN/m<sup>3</sup>);  
 q = carregamento distribuído na superfície do maciço (kPa);  
 Lr = comprimento do trecho reforçado de solo (m);  
 $\phi'_1$  = ângulo de atrito do solo reforçado minorado (°).

Considerando que o fator de segurança mínimo para que a estrutura esteja estável quanto ao deslizamento é 1,5, é possível dimensionar o comprimento mínimo (Lr) do reforço para que atenda tal condição.

$$Lr = \frac{FSd * E}{(\gamma_1 * H + q) * \tan \phi'_1} \quad (4)$$

Calcula-se o ângulo de atrito minorado para o solo de reforço conforme Equação (5), considerando-se 1,25 para o fator de redução de pico, a título de se considerar a minoração do parâmetro de ângulo de atrito a volume constante, na etapa de ruptura.

$$\phi'_1 = \arctan\left(\frac{\tan \phi}{f_\phi}\right) \quad (5)$$

Sendo  $\phi$  = ângulo de atrito do solo de reforço (°);  
 $f_\phi$  = fator de minoração de resistência (adim.).

Quanto à verificação quanto ao tombamento, deseja-se obter um fator de segurança mínimo de 2 para o sistema Terramesh® de forma que o momento fletor resistente deva ser pelo menos duas vezes o valor do momento solicitante Equação (6).

$$FSt = \frac{(\gamma_1 * H + q) * Lr^2}{2E * y_e} \geq 2,0 \quad (6)$$

Sendo  $y_e$  a distância vertical entre o ponto no qual se posiciona o esforço concentrado do empuxo ativo atuante na contenção e a extremidade inferior do muro (m).

Logo, o comprimento mínimo do reforço para que atenda o FS mínimo de 2,0, é dado pela Equação (7).

$$Lr = \sqrt{\frac{2 * FSt * E * y_e}{(\gamma_1 * H + q)}} \quad (7)$$

Cabe destacar que também é verificada a segurança contrarruptura e deformações excessivas no terreno de fundação. A resultante das tensões atuantes na base do solo reforçado deve garantir que toda a base esteja submetida apenas a esforços de compressão. Para que isso ocorra, a excentricidade gerada deve ser inferior a sexta parte de Lr, conforme demonstrado pela Equação (8).

$$e = \frac{Ka_3 \left(1 + 3 * \frac{q}{\gamma_3 * h}\right)}{6 * \left(\frac{\gamma_1}{\gamma_3} + \frac{q}{\gamma_3 * h}\right)} * \left(\frac{H^2}{Lr}\right) \leq \left(\frac{Lr}{6}\right) \quad (8)$$

As incógnitas com o índice 3 se referem aos parâmetros do solo de fundação, sendo o coeficiente de empuxo ativo também calculado pela Equação (1).

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 sua base, conforme indicado na Equação (9).

$$FSf = \frac{qm_{\max}}{\sigma} \geq 3,0 \quad (9)$$

Sendo  $qm_{\max}$  = capacidade de carga do solo de fundação (kPa);  
 $\sigma$  = tensão normal atuante na base do muro (kPa). A partir das formulações elaboradas por Terzaghi e Peck (1967), Equação (10), é possível determinar a capacidade de carga do solo.

$$qm_{\max} = c' * Nc + qs * Nq + 0,5 * \gamma_3 * B' * N\gamma \quad (10)$$

Sendo  $c'$  = coesão do solo de fundação (kPa);  $qs$  = sobrecarga a nível da superfície, em caso de fundações enterradas (kPa);  $B'$  = comprimento da fundação (m);  $Nc$ ,  $Nq$  e  $N\gamma$  os fatores de

capacidade de carga, determinados pela Equação (11), Equação (12) e Equação (13).

$$Nq = e^{\pi \tan \Phi'} * \tan^2(45^\circ + \Phi'_3/2) \quad (11)$$

$$Nc = Nq - 1 * \cotan \Phi'_3 \quad (12)$$

$$N\gamma = 1,80 * (Nq - 1) * \tan \tan \Phi'_3 \quad (13)$$

Após determinar tais fatores e substituindo-os, junto com os parâmetros, na Equação (10), obtém-se a capacidade de carga do solo de fundação. A partir da formulação de Meyerhoff (1955) pode-se determinar a distribuição uniforme de tensões normais na base do solo reforçado Equação (14).

$$\sigma = \frac{3(\gamma_1 * h + q)}{3 - ka2 \left( \frac{\gamma_2 * h + 3q}{\gamma_1 * h + 3q} \right) * \left( \frac{H}{Lr} \right)^2} \quad (14)$$

Por fim, é realizada a verificação no que tange à ruptura do paramento. Os parâmetros de entrada da solução em solo reforçado foram altura do muro de 7,80 m, a inclinação do paramento de 70°, rejeito underflow como material e malha hexagonal de dupla torção 8x10, arame 2,70 mm, revestidas em PVC e reforçada com varetas de aço. Essa malha hexagonal é revestida em sua face posterior por uma tela eletrossoldada, uma geomanta ou uma Biomanta e sustentada por dois elementos metálicos em forma de “mão francesa”. Cabe ressaltar que essas malhas foram espaçadas a cada 60 cm e possuem 6 m de comprimento. Ademais, foi considerada uma sobrecarga de 78,0 kN/m<sup>2</sup> em cenário operacional, considerando sobrecarga do equipamento mais pesado durante etapa construtiva. Diante da explanação supracitada, os FS para deslizamento, tombamento, ruptura do solo de fundação são, respectivamente, FSdes=15,59; FStomb=46,89 e FSbase=8,37, conforme indicado na Figura 1. É válido mencionar que esses fatores estão de acordo com o preconizado pela a norma brasileira ABNT NBR 11.682 de 2009, a qual dispõe diretrizes acerca de muros de gravidade e de estabilidade de encostas.

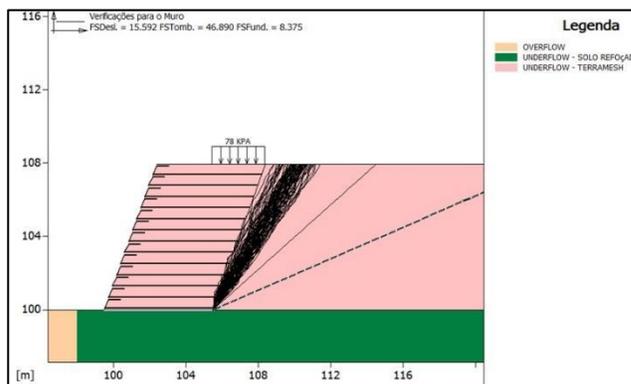


Figura 1 - Verificação dos fatores de segurança deslizamento, tombamento, ruptura do solo de fundação – Sobrecarga de equipamento 78 KPa.

Com o intuito de compreender as tensões solicitantes e as deformações sofridas ao longo do processo construtivo do sistema Terramesh®, foram realizadas análises de tensão x deformação pelo método dos elementos finitos (MEF) em condição drenada com emprego do *software* Phase2® da Rocscience. Por sua vez, as análises por equilíbrio limite foram realizadas por meio do programa computacional de estudos bidimensionais Slide2®. Para obtenção dos fatores de segurança, foram adotados os métodos de busca de superfícies de ruptura Morgenstern-Price e Spencer.

### 3 PARÂMETROS DE ANÁLISE

#### 3.1 Parâmetros adotados

Os parâmetros de resistência dos materiais foram definidos com base em correlação com ensaios SPT e CPTu, bem como ensaios triaxiais. Com base em tais parâmetros, foram desenvolvidas análises de estabilidade por equilíbrio limite e análises tensão deformação de forma a validar o dimensionamento da estrutura e viabilizar a proposta de reforço. Os parâmetros geotécnicos da fundação e dos materiais definidos e utilizados nas análises estão apresentados na Tabela 1. Por sua vez, os parâmetros de resistência da malha hexagonal de dupla torção que compõe o Terramesh® é apresentado na Tabela 2 e foram fornecidas pelo fabricante.

Tabela 1. Parâmetros de resistência ao cisalhamento e deformabilidade do material

MATERIAL	ENVOLTÓRIA RESISTÊNCIA	E [Mpa]	v	γ (kN/m³)	c' (kN/m²)	φ' (°)
Rejeito Underflow	Mohr-Coulomb	25.200	0,3	19	1	36
Rejeito Overflow Barragem 2	Mohr-Coulomb	4.500	0,3	15	0	23
Solo Residual	Mohr-Coulomb	24.750	0,4	17,5	25	32
Colúvio	Mohr-Coulomb	21.000	0,4	18	8	25
Estéril	Mohr-Coulomb	56.100	0,4	21	5	35
Aterro/Dique de Partida	Mohr-Coulomb	10.500	0,4	21	20	28
Aterro de Reforço	Mohr-Coulomb	10.500	0,4	17	5	27
Underflow - Terramesh®	Mohr-Coulomb	71.400	0,3	19	1	36
Underflow - Solo Reforçado	Mohr-Coulomb	71.400	0,3	19	1	36
Rejeito Overflow Barragem 1	Mohr-Coulomb	4.500	0,4	17	0	34
Rocha Alterada	Mohr-Coulomb	150.000	0,4	20	40	40

Tabela 2. Parâmetros de resistência da malha hexagonal de dupla torção que compõe o Terramesh®

MATERIAL	Friction Angle (°)	Long Term Design Strength (kN/m)	Connection Strength (kN/m)
Terramesh®	36	45,871	45,871

#### 4 RESULTADOS OBTIDOS

Destaca-se que os fatores de segurança do muro mediante equilíbrio limite indicaram que o alteamento com emprego da solução apresentada é estável. Também, as análises tensão deformação, as quais permitiram identificar as máximas tensões cisalhantes, deslocamentos totais, apresentaram resultados satisfatório e dentro do esperado frente ao cenário avaliado. Na Figura 2, é apresentada a análise de estabilidade por equilíbrio limite da Seção B-B' com emprego do Terramesh®.

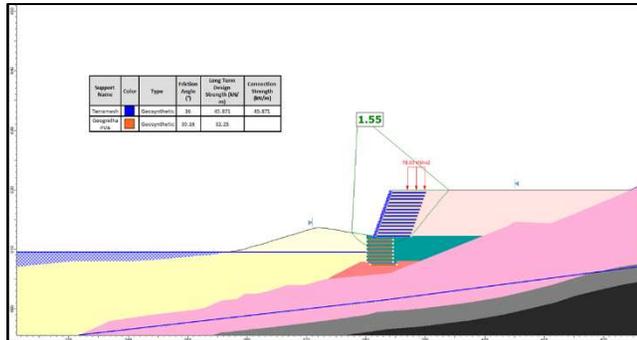


Figura 2 – Análise Local – Não Circular – Nível Freático Atual – Sobrecarga de equipamento 78 KPa. Software Slide2 Rocscience®.

Para a seção de análise, além dos deslocamentos verticais e horizontais, também foram avaliadas a plastificação e deformação cisalhante no estágio final do empreendimento, ou seja, considerando a implementação de 7,80 m de solo reforçado (El. 612,20 m até a El. 620,00 m). Dentre a Figura 3 até a Figura 6, estão dispostos os resultados das análises supracitadas. Destaca-se que os vetores apresentados em algumas dessas figuras indicam o sentido dos deslocamentos previstos na modelagem.

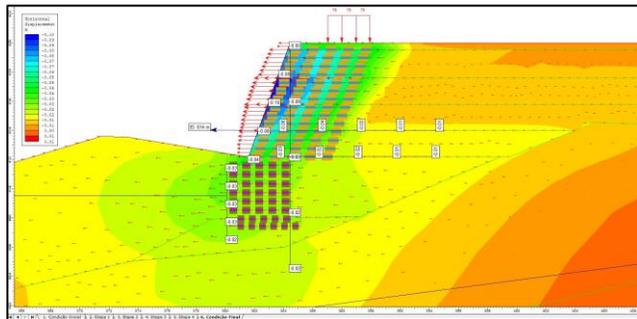


Figura 3 – Deslocamentos horizontais – Etapa final de 7,80m do sistema Terramesh® (El. 612,20 m até a El. 620,00 m) e Sobrecarga de equipamento 78 KPa. Software MEF Phase2 Rocscience®.

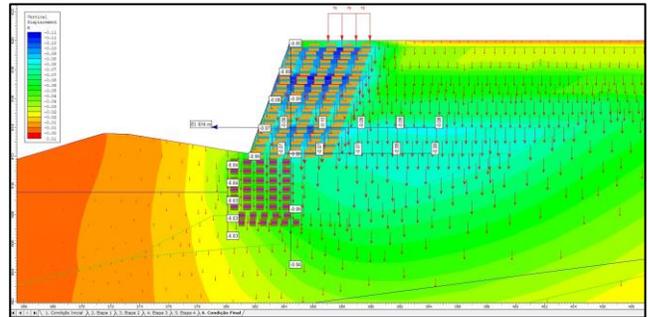


Figura 4 – Deslocamentos Verticais – Etapa final de 7,80m do sistema Terramesh® (El. 612,20 m até a El. 620,00 m) e Sobrecarga de equipamento 78 KPa. Software MEF Phase2 Rocscience®.

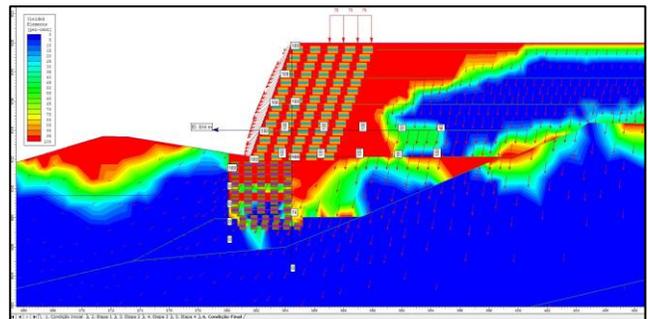


Figura 5 – Plastificação – Etapa final de 7,80m do sistema Terramesh® (El. 612,20 m até a El. 620,00 m) e Sobrecarga de equipamento 78 KPa. Software Phase2 MEF Rocscience®.

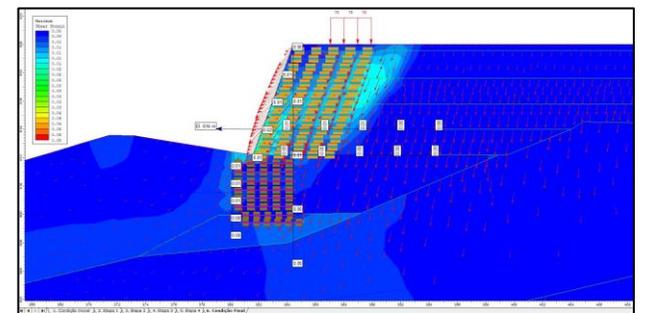


Figura 6 – Deformação Cisalhante – Etapa final de 7,80m do sistema Terramesh® (El. 612,20 m até a El. 620,00 m) e Sobrecarga de equipamento 78 KPa. Software MEF Phase2 Rocscience®.

De acordo com a Figura 2 à Figura 5, são esperados deslocamentos acumulados máximos de 8 cm na horizontal e de 10 cm na vertical. Tais deslocamentos são aceitáveis para uma estrutura de 7,80 m por possuírem ordem de grandeza de 1% da altura total do muro com solo reforçado. Quanto à plastificação e à deformação cisalhante, a seção apresentou comportamento satisfatório e dentro do esperado frente ao cenário avaliado. De acordo com a Figura 4, ocorre plastificação em regiões próximas à face do sistema Terramesh®. Contudo, a Figura 5 evidencia que não foram identificadas regiões com deformações máximas cisalhantes superiores a 5%, cuja cunha de ruptura possa levar ao colapso da estrutura.

#### 5 CONCLUSÕES

Após uma análise das condições atuais e das necessidades de reforço da estrutura com bermas construídas com rejeito, é possível afirmar que a solução proposta com emprego de solo reforçado, apresenta-se como uma abordagem adequada e eficaz para garantir

a estabilidade e segurança da estrutura. Com relação aos fatores de segurança do muro com solo reforçado quanto ao deslizamento, ao tombamento e à ruptura do solo de fundação os respectivos valores,  $FS_{\text{Deslizamento}}=15,59$ ;  $FS_{\text{Tombamento}}=46,89$  e  $FS_{\text{Base}}=8,38$ , indicam que a estrutura atende aos critérios normativos no que concerne ao dimensionamento de um muro de gravidade. Tais valores atendem ao preconizado pela norma brasileira ABNT NBR 11.682/2009.

Por sua vez, as análises por equilíbrio limite, desenvolvidas por meio do programa computacional de estudos bidimensionais Slide2®, também indicaram que o alteamento com emprego da alternativa apresentada atende aos critérios normativos vigentes (ABNT NBR 13.028/2017).

A partir dos estudo tensão x deformação para a seção em análise da Barragem conclui-se que os deslocamentos horizontais e verticais obtidos são aceitáveis por possuírem ordem de grandeza de 1% da altura total do sistema. Quanto à plastificação e à deformação cisalhante, a seção apresentou comportamento satisfatório e dentro do esperado, visto que, apesar de algumas porções próximas à face do muro com solo reforçado apresentarem plastificação, não foram identificadas regiões com deformações máximas cisalhantes superiores a 5%, cuja cunha de ruptura possa levar ao colapso da estrutura.

Portanto, de acordo com as análises, conclui-se que o alteamento constituído por rejeito underflow, malha hexagonal de dupla torção, associado a um paramento frontal plano e inclinado em 70° apresenta baixa deformação na base da estrutura, além de se tratar de solução exequível em regiões com restrições de área para construção de taludes mais convencionais, restrições de acesso para execução das obras e com escassez de materiais granulares.

A proposta torna-se, portanto, uma alternativa viável e adequada, principalmente, quando se tem limitações de espaço físico e disponibilidade de materiais de empréstimo.

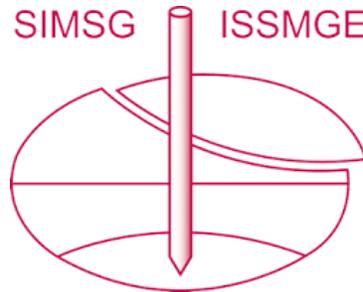
## 6 RECONHECIMENTOS

Os autores agradecem à Fontes Geotécnica por ter proporcionado um ambiente acolhedor para superação de desafios, com oportunidade e incentivo para desenvolver projetos inovadores para atender nossos clientes e divulgar os resultados no meio científico para promover o conhecimento na comunidade geotécnica.

## 7 REFERÊNCIAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2017). NBR 13.028. Mineração – Elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação de água: Requisitos. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2009). NBR 11.682. Estabilidade de Encostas. Rio de Janeiro.
- Costa, C.M.L.; Lodi, P.C.; Costa, Y.D.J.; Bueno, B.S. Avaliação de recomendações normativas sobre o uso de ensaios no controle de qualidade de fabricação de geossintéticos. Polimeros: Ciência e Tecnologia, São Carlos, v.18, n.2, p.158-169, 2008.
- Gangakhedkar, R. (2004). Geosynthetic Reinforced Pile Supported Embankments. Dissertação de Mestrado, University of Florida.
- Meyerhof, G. G. (1955) Influence of roughness of base and ground-water conditions on the ultimate bearing capacity of foundations. Géotechnique, v. 5, n. 3, p.227-242.
- Rankine, W. On the stability of loose earth. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, v. 147, 1857.

# 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 12<sup>th</sup> to November 16<sup>th</sup> 2024 in Chile.*