

XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
IX Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas
IX Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
VI Conferência Sul Americana de Engenheiros Geotécnicos Jovens
XI Congresso Luso Brasileiro de Geotecnia
23 a 26 de Agosto de 2022 – Campinas – SP



COBRAMSEG 2022
23 A 26 DE AGOSTO | CAMPINAS | SP | BRASIL
COBRAMSEG | SBMR | GEOJOVEM | CLBG

Projeto Executivo de uma Estrutura em Solo Reforçado Aplicando Técnica Alternativa

Jair Malta do Nascimento Júnior

Engenheiro Civil, Ouro Branco, Brasil, j.malta97@hotmail.com

Matheus Vidigal Pinto

Estudante de Engenharia Civil, Universidade Federal de São João del-Rei, Ouro Branco, Brasil, matvids7@gmail.com

Tales Moreira de Oliveira

Engenheiro Civil, Ouro Branco, Brasil, tales@ufsj.edu.br

Rafaela Andrade Nunes

Estudante de Engenharia Civil, Universidade Federal de São João del-Rei, Ouro Branco, Brasil, rafaela.andrade.n2104@gmail.com

RESUMO: Nos dias atuais, o viés da sustentabilidade proporciona a utilização de soluções inovadoras que de alguma forma reaproveitem resíduos oriundos de processos produtivos. Visando uma solução com potencial econômico e sustentável para regiões siderúrgicas, propõe-se a utilização da escória de aciaria como material de preenchimento de estruturas de contenção. Nesse contexto, foi realizado um projeto executivo apresentando uma proposta de contenção para a erosão localizada no Campus Alto Paraopeba, da Universidade Federal de São João del-Rei, utilizando bags de geogrelha preenchidas com escória. Primeiramente realizou-se um levantamento topográfico da erosão com a utilização de um VANT, popularmente conhecido como drone. Após obtenção da ortofoto, utilizou-se o *software Autocad Civil 3D* para gerar as curvas de nível e posteriormente a superfície 3D da erosão. Por fim, a contenção foi dimensionada baseando-se na superfície obtida e utilizando metodologias de cálculo para verificar a estabilidade interna e externa do sistema. Os resultados obtidos foram satisfatórios uma vez que em todos os cálculos foram encontrados fatores de segurança admitidos pelas normas vigentes, afirmando assim a viabilidade técnica da solução. Além disso, há o fator econômico e sustentável, uma vez que a escória muitas vezes não possui uma destinação final adequada.

PALAVRAS-CHAVE: Voçoroca, Contenção, Projeto Executivo, Escória, Geogrelha.

1 Introdução

A região do Alto Paraopeba está inserida em uma formação geológica-geotécnica de grande potencial erosivo, uma vez que, segundo Oliveira e Cruz (2018), o solo local é originado de rochas metamórficas que dão origem aos gnaisses. Esse tipo de solo apresenta alta variabilidade mineralógica, resultando num comportamento complexo e variável. Há aproximadamente 15 anos, no Campus Alto Paraopeba (CAP), da Universidade Federal de São João Del-Rei, cidade de Ouro Branco, Minas Gerais, instalou-se um processo erosivo que atualmente encontra-se no estágio de uma voçoroca (Figura 1).

No ano de 2014, por meio de ação licitatória, foi realizado um projeto para estabilização da voçoroca, porém apenas em 2021 houve viabilidade financeira para execução da obra, fato que deixou o projeto não aderente à situação uma vez que o processo erosivo prosseguiu durante esses anos. Dessa forma, o projeto original necessitou de atualizações e adequações e o presente trabalho objetivou fazê-las como uma forma alternativa.



Figura 1. Vista aérea da voçoroca.

2 Objetivos

Este trabalho visou realizar um projeto alternativo de contenção de uma voçoroca existente no Campus Alto Paraopeba da Universidade Federal de São João del-Rei utilizando uma solução inovadora de escória e geossintético, uma vez que o projeto original, realizado em 2014, não era aderente à situação atual. Foram aplicadas técnicas da metodologia BIM para a concepção do projeto com a utilização do *software AutoCad Civil 3D*.

3 Metodologia

3.1 Topografia

Para a concepção do projeto foi realizado um levantamento topográfico por VANT (Veículo Aéreo Não Tripulado) em junho de 2020 para obter as características atuais da área degradada em estudo. O processo foi realizado por um drone modelo MATRIC-100.

Com as imagens obtidas pelo levantamento e seguindo processo de sensoriamento remoto, foi possível traçar a nuvem de pontos, como também a ortofoto, que serviu de base para gerar as curvas de nível da área. De posse das informações anteriores, foi gerado o modelo 3D do terreno usando o *software Autocad Civil 3D*, conforme apresentado na Figura 2

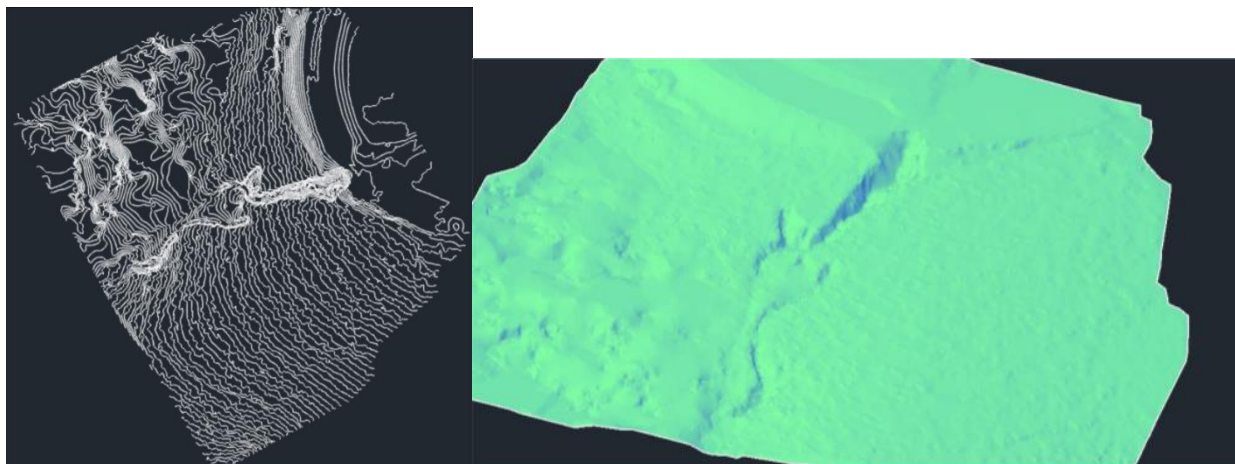


Figura 2. Curvas de Nível e Modelo 3D do Terreno



3.2 Análise Geológica-Geotécnica

A análise geológica-geotécnica da região se deu através da consulta em literatura sobre estudos do comportamento do solo da região de interesse, como também das curvas de nível obtidas e na realização de investigações de campo, mais precisamente ensaios SPT, conforme Figura 3.

De acordo com Oliveira e Cruz (2018), a voçoroca possui em média, uma perda de partículas na ordem de 1580,5 m³ por ano. Além disso, o solo presente tem origem em rocha metamórfica gnáissica, apresentando composição amplamente heterogênea, sendo predominantemente argilosilteoso. O solo indicou ainda condição de argilas pré-adensadas e comportamento bilinear quando submetido ao ensaio de cisalhamento direto.



Figura 3. Mapa dos Furos de sondagem. Fonte: Acervo da Universidade Federal de São João del-Rei

De posse dos resultados da sondagem e do levantamento topográfico realizado, foi possível traçar o perfil geológico-geotécnico da área e consequentemente sua estratigrafia. Posteriormente, utilizando o *software Slide* foi possível realizar uma análise de estabilidade de talude preliminar, sem a contenção proposta, para entender o risco associado à situação atual.

3.3 Proposta Técnica-Financeira para a solução do problema

Conforme citado anteriormente, houve um projeto inicial para contenção da erosão, sendo a solução proposta a construção de uma escada hidráulica em gabião e inserção de biomanta revestindo os taludes laterais.

A solução encontrada para viabilizar o projeto sem grande adição de custos foi mesclar a escada hidráulica, juntamente com alteamentos de platôs em Estrutura de Escória Reforçada com Geogrelha (EERG), conforme Figuras 4 e 5

Mais precisamente, a mescla das duas soluções, apresenta na parte central da voçoroca a utilização de gabião caixa preenchido com escória, formando uma escada hidráulica, e nas extremidades (pico e vale) e abaixo do gabião, utiliza-se a estrutura de escória reforçada com geossintético (EERG), que se trata de um muro de solo reforçado com escória e com o faceamento da estrutura sendo realizado com fôrmas tubulares de geossintético e escória, permitindo-se preencher toda a área erodida fazendo assim a reconformação do terreno.

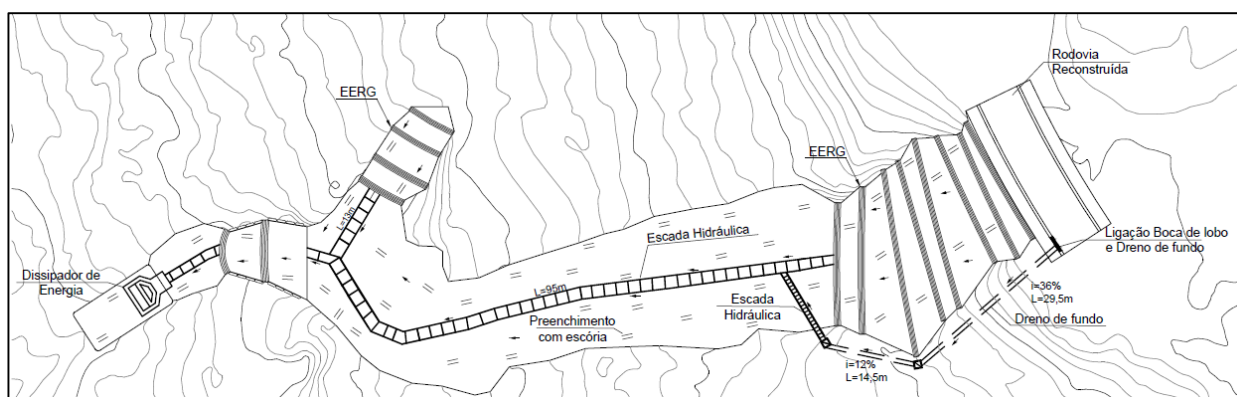


Figura 4. Planta baixa da solução proposta

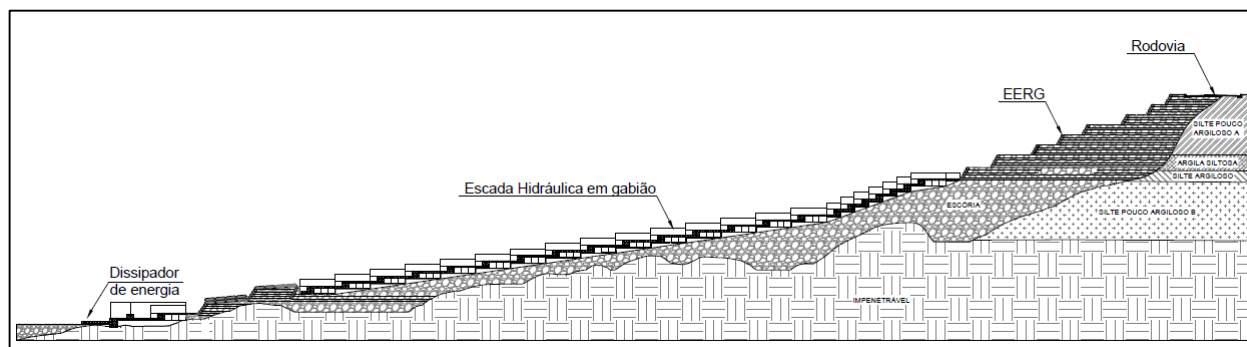


Figura 5. Seção Longitudinal da solução proposta

3.4 Estabilidade interna

No dimensionamento de estruturas de solo reforçado um aspecto particular é a necessidade de análise da sua estabilidade interna. Gomes *et al.* (2021) afirma que quando as solicitações impostas ao reforço são maiores àquelas que ele pode suportar ou quando, por insuficiência de ancoragem, ocorre o escorregamento do reforço na massa de solo, pode ocorrer a ruptura interna.

A instabilidade interna pode ocorrer por ruptura do reforço (Figura 6-a) e por arrancamento do reforço (Figura 6-b).

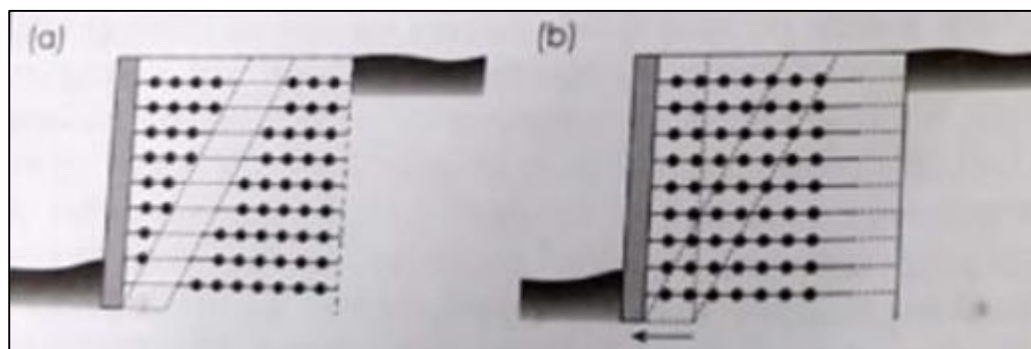


Figura 6. Mecanismos para análise de instabilidade interna. Fonte: Vertematti (2015) p.114

3.4.1 Ruptura solo-reforço

Para avaliar a ruptura solo-reforço, foi necessário comparar a tração máxima admissível da geogrelha e a tração de ruptura da geogrelha, sendo que essa relação deve ser maior que 1,5 de acordo com a ABNT NBR 16920/2021. Para obter a tração máxima admissível da geogrelha foi utilizado a Equação 1, além de ter sido necessário avaliar fatores de redução devido à fluência, devido a danos mecânicos e devido a danos químicos.

$$T_{adm} = \frac{T_k}{\sum F_r} \quad (1)$$

Onde: T_k é a resistência à tração da geogrelha, 200 kN/m; e F_r são os fatores de redução, conforme citado acima, igual a 10.

Por sua vez, a tração de ruptura da geogrelha, depende da geometria do muro e foi calculada pela Equação 2

$$T_{rup} = \gamma \cdot (H - S_v) \cdot K_a \cdot S_v \quad (2)$$



Onde: γ é o peso específico da escória, igual a 30 kN/m³; H é a altura total do muro, igual a 1,83 m; S_v é o espaçamento vertical do reforço, igual a 0,3195 m; K_a é o coeficiente de empuxo ativo de Rankine, igual a 0,8465.

3.4.2 Arrancamento

A resistência ao arrancamento foi obtida pela Equação 3.

$$F_p = 2 \cdot (C' + \gamma \cdot S_v \cdot \tan \phi' \cdot L_a) \quad (3)$$

Onde: C' é a coesão, igual a 0 por se tratar de escória; γ é o peso específico da escória, igual a 30 kN/m³; ϕ' é o ângulo de atrito da escória, igual a 44°; S_v é o espaçamento vertical do reforço, igual a 0,3195 m; e L_a é o comprimento de ancoragem, igual a 1,36 m.

Segundo a ABNT NBR 16920/2021, a força resistente deve ser comparada com a força solicitante ao arrancamento, que é dada pela Equação 4.

$$T_{\max} = \gamma \cdot K_a \cdot S_v \cdot \frac{S_v}{2} \quad (4)$$

Onde: K_a é o coeficiente de empuxo ativo de Rankine, igual a 0,8465; γ é o peso específico da escória, igual a 30 kN/m³; e S_v é o espaçamento vertical do reforço, igual a 0,3195 m.

3.5 Estabilidade externa

As verificações empregadas para a estabilidade externa das estruturas de contenção em solo reforçado são as mesmas empregadas em muros de gravidade tradicionais, ou seja, a estabilidade é verificada em termos de tombamento do maciço reforçado, deslizamento ao longo de um plano preferencial, ruptura da fundação por falta de capacidade de suporte e ruptura global, conforme Koerner (1998).

É importante ressaltar que o deslizamento e o tombamento foram verificados através das formulações de cálculo descritas abaixo e a ruptura global foi avaliada por meio do *software Slide*. O muro de solo reforçado com geossintético e escória trata-se de uma solução flexível, portanto recalques gerados na base não são prejudiciais por não causar patologias como, por exemplo, trincas. Sendo assim, a capacidade de carga da fundação não necessitou ser verificada.

Para o cálculo dos mecanismos descritos acima, fez-se necessário o cálculo do empuxo, dado pela Equação 5. Porém, além do empuxo, foi necessário calcular a força atuante distribuída por metro de muro (P_a), por meio da Equação 6

$$E = \gamma \cdot K_a \cdot H + K_a \cdot q \quad (5)$$

Onde: K_a é o coeficiente de empuxo ativo de Rankine, igual a 0,8465; γ é o peso específico da escória, igual a 30 kN/m³; H é a altura total do muro, igual a 1,83 m; e q é a sobrecarga aplicada devido as meshbags, igual a 24 kN/m².

$$P_a = \frac{E \cdot H}{2} \quad (6)$$

Onde: E é o empuxo ativo atuante no muro, igual a 66,8 kN/m²; e H é a altura total do muro, igual a 1,83 m.

3.5.1 Deslizamento

A força resistente ao deslizamento foi obtida através da Equação 7.

$$F_{\text{res}} = 0,5 \cdot C' + A \cdot \gamma \cdot \frac{2}{3} \cdot \tan \phi \quad (7)$$



Onde: C' é a coesão, igual a 0 por se tratar de escória; A é a área resistente do muro, igual a 4,15 m²; γ é o peso específico da escória, igual a 30 kN/m³; e ϕ' é o ângulo de atrito da escória, igual a 44°.

3.5.2 Tombamento

De acordo com a ABNT NBR 16920/2021 para verificar o tombamento, a razão de momentos estabilizantes e momentos instabilizantes deve ser maior que 2,0. O momento estabilizante foi encontrado através da Equação 8 e o instabilizante pela Equação 9.

$$M_{\text{estabilizante}} = A \cdot d \cdot \gamma \quad (8)$$

Onde: A é a área resistente do muro, igual a 4,15 m²; d é o braço de alavanca gerado pelo peso próprio do muro, sendo a distância a partir do centro geométrico do muro e sua extremidade, igual a 1,72 m; e γ é o peso específico da escória, igual a 30 kN/m³.

$$M_{\text{instabilizante}} = \frac{P_{\text{hor}} \cdot H}{3} \quad (9)$$

Onde: P_{hor} é a força horizontal atuante no muro, igual a 47,57 kN/m; e H é a altura total do muro, igual a 1,83 m.

3.5.3 Estabilidade global

Os parâmetros adotados para o solo foram obtidos por Romualdo e Romão (2018), seguindo o modelo de Mohr-Coulomb, obtidos através de correlações com ensaios SPT realizados no local. Para o cálculo da estabilidade global da contenção proposta, foi utilizado o *software Slide*, adotando as metodologias de Bishop, Spencer, Janbu e Morgenstern-Price.

4 Resultados e discussões

4.1 Estabilidade interna

Com relação à ruptura solo-reforço, utilizando as Equações 1 e 2, foi encontrado o valor de 20 kN/m para a tração máxima admissível e 12,26 kN/m para a tensão de ruptura na geogrelha. Por fim, realizando uma razão entre os fatores, obteve-se um fator de segurança igual a 1,63. Como esse fator é maior que 1,5 (pré-definido pela norma de muros de taludes em solo reforçados, ABNT NBR 16920/2021), está verificado quanto à ruptura do reforço.

Para o arrancamento, utilizou-se as Equações 3 e 4. A resistência ao arrancamento foi igual a 25,15 kN/m e a força solicitante ao arrancamento obtida foi 1,30 kN/m. Dividindo a força resistente pela solicitante encontrou-se um fator de segurança de 19,35. Como esse fator é maior que 1,5 o muro está verificado com relação ao arrancamento do reforço.

4.2 Estabilidade externa

A força resistente ao deslizamento foi obtida através da Equação 7, sendo igual a 80,15 kN/m. Segundo a ABNT NBR 16920/2021, a força resistente ao deslizamento deve ser comparada com a força atuante no muro (P_a), porém a força P_a que gera deslizamento é a horizontal, sendo necessário a decomposição. O ângulo obtido foi 38,96°, gerando assim uma força $P_{a\text{hor}}$ igual a 47,57 kN/m. A relação entre força resistente e solicitante, isto é, fator de segurança contra o deslizamento, foi igual a 1,68, maior que 1,5, dessa forma o muro está verificado quanto ao deslizamento.

Com relação ao tombamento, o momento estabilizante foi encontrado através da Equação 8, sendo igual a 214 kN/m e o instabilizante pela Equação 9, igual a 29,04 kN/m. Como a razão (fator de segurança) entre eles foi igual a 7,37, o muro está verificado com relação ao tombamento.



Para a estabilidade global, a Figura 7 apresenta a superfície de ruptura crítica obtida através do método de Janbu, com valor de fator de segurança igual a 2,29. Sendo assim, está verificado com relação à essa análise.

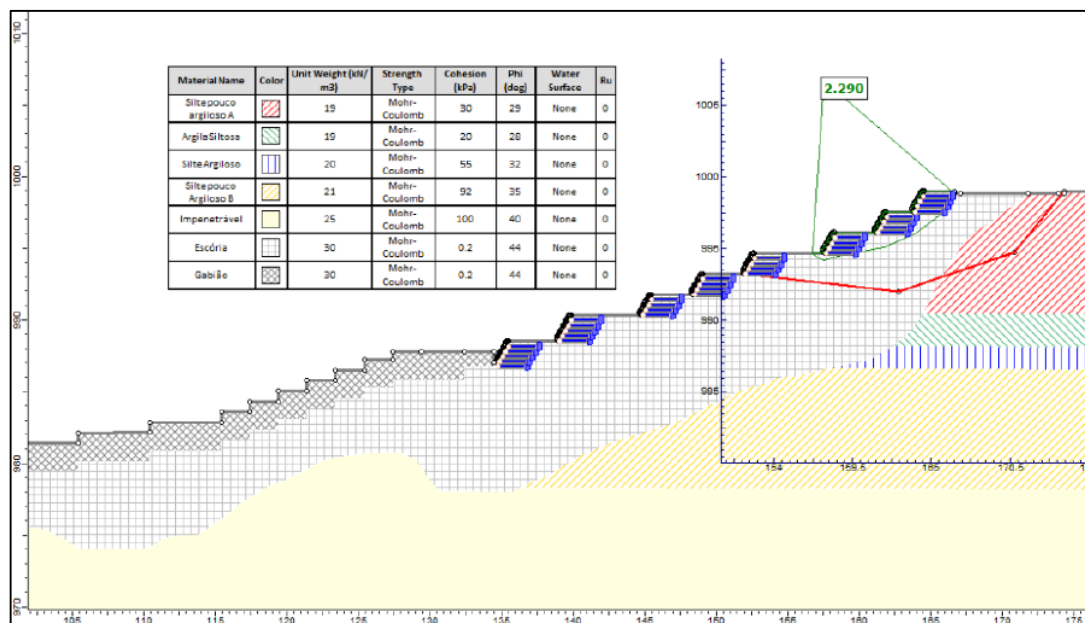


Figura 7. Resultado do Slide para o fator de segurança final.

Para resumir, as Tabelas 1 e 2 apresentam os valores encontrados para os fatores de segurança (FS) da estrutura de solo reforçado com geossintético e escória e compara com os valores requeridos por norma.

Tabela 1. Fatores de segurança estabilidade externa

Estabilidade	Mecanismo	FS (ABNT NBR 16920/2021)	FS obtido
Externa	Deslizamento	1,5	1,68
	Tombamento	2,0	7,37
	Ruptura Global	1,5	2,29

Tabela 2. Fatores de segurança estabilidade interna

Estabilidade	Mecanismo	FS (ABNT NBR 16920/2021)	FS obtido
Interna	Ruptura estrutural do reforço	1,5	1,63
	Arrancamento do reforço	1,5	19,35

5 Conclusão

Após todas as análises, concluiu-se que o modo de falha para ruptura global não é o parâmetro pré-determinante para a utilização da contenção conforme proposto no projeto, uma vez que seu fator de segurança foi bem acima de 1,5. O modo de falha que condicionou a contenção da forma como ela é proposta (com comprimento de geossintético de 2,0 m entre camadas) foi a ruptura estrutural do reforço.



Conforme explicitado durante o presente trabalho, o objetivo principal era desenvolver um projeto executivo e alternativo às soluções em execução, envolvendo toda a extensão da voçoroca do Campus Alto Paraopeba, uma vez que o projeto realizado em 2014 deixou de ser aderente à situação atual.

Todo o projeto foi baseado nas normas vigentes e nas boas práticas de engenharia. Os resultados obtidos foram satisfatórios uma vez que em todos os cálculos foram encontrados valores admitidos pela norma ABNT NBR 16920/2021, conforme apresentado na Tabela 1, sendo assim afirma-se a viabilidade técnica.

Com relação ao viés econômico e sustentável, pode-se dizer que o projeto atende ao esperado, uma vez que utiliza escória, material que muitas vezes não possui uma destinação final adequada. Além disso, possui alto potencial de aplicação em toda região do Alto Paraopeba e em regiões siderúrgicas em geral.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2018). NBR ISO 10318-1: *Geossintéticos – Termos e definições*. São Paulo.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2021). NBR 16920: *Muros e Taludes em solos reforçados*. Rio de Janeiro.
- Gonçalves, A. H. R., Batista, S. E (2019). *Avaliação dos Deslocamentos de uma Estrutura de Escória Reforçada com Geossintético (EERG)*. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal de São João del Rei, Ouro Branco, 83 p.
- Oliveira, A. C., Cruz, V. M (2018). *Comportamento Geotécnico de uma Voçoroca Localizada no Campus Alto Paraopeba, em Ouro Branco, MG*. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal de São João del Rei, Ouro Branco, 55 p.
- Oliveira, L. A., Ramos, R. C (2017). *Proposta de um Novo Sistema de CONTENÇÃO Denominado como Fôrma Tubular de GSY e Escória*. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal de São João del Rei, Ouro Branco, 112 p.
- Romulado J. C., Romão, L. V (2018). *Análise Probabilística Aplicada a Estabilidade de Talude*. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal de São João del Rei, Ouro Branco, 51 p.
- Santos, C. M., Ferreira, G. A (2015). *Estudo de Avaliação da Erosão no Campus Alto Paraopeba, Ouro Branco, Minas Gerais*. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal de São João del Rei, Ouro Branco, 50 p.
- Vertematti, J. C (2015). *Manual Brasileiro de Geossintéticos*. 2ª Edição. São Paulo: Blucher.