



Proteção Contra Processos Erosivos de Taludes Marginais a uma Lagoa de Cava de Mineração através de Enrocamento Envelopado por Tela Metálica Flexível

Felipe Gobbi

Engenheiro Civil, FGS Geotecnica, Porto Alegre, Brasil, felipe@fgs.eng.br

Alvaro Pereira

Engenheiro Civil, FGS Geotecnica, Porto Alegre, Brasil, alvaro@fgs.eng.br

Sérgio Gonçalves Pena

Engenheiro Civil, FGS Geotecnica, Nova Lima, Brasil, pena@fgs.eng.br

Daniel Gomes

Engenheiro Civil, FGS Geotecnica, Nova Lima, Brasil, daniel@fgs.eng.br

Roberta Carolina Alves

Engenheira Civil, VALE S.A, Nova Lima, Brasil, roberta.alves@vale.com

RESUMO: Este artigo tem por objetivo apresentar uma solução para proteção de margem de taludes marginais a lagoa de uma cava a céu aberto, em uma mina em processo de descomissionamento. Para o trecho de estudo foram constatados diversos pontos com erosões de margem nos taludes, estes compostos por rocha branda e solos residuais, mais especificamente o Itabirito Friável. Estas erosões foram condicionadas principalmente pela ocorrência de impactos de ondas, causadas tanto pelo vento como pelo fluxo de embarcações e também pelo fluxo subterrâneo do talude em direção ao lago em alguns locais. Diferentes alternativas foram estudadas para frear os processos de erosão de margem, entretanto, devido às condicionantes morfológicas e geotécnicas locais, o conceito de solução evoluiu até a configuração de um conjunto de soluções: viga atirantada para garantia da estabilidade da porção inferior do talude, enrocamento contido por malha de aço de alta resistência para amortecimento do impacto de onda e estabilização dos processos erosivos de margem. Devido à flexibilidade da estrutura foi possível se obter melhor conformação da camada de enrocamento sobre a face da encosta, além de maior permissibilidade do sistema para o caso de impactos de ondas e movimentações dos blocos de rocha, devido ao envelopamento e ancoragem do sistema. Através do monitoramento entre o período chuvoso de 2024-2025, com tráfego náutico diário, a solução apresentou ótimo desempenho quanto a proteção dos taludes.

PALAVRAS-CHAVE: proteção de taludes, margem, erosão por ondas, enrocamento, tela flexível.

ABSTRACT: This article aims to present a solution for protecting the margin of slopes adjacent to the lagoon of an open pit mine in a mine undergoing decommissioning. In the study area, several points with erosion were found on the slope toes, which are composed of soft rock and residual soils, more specifically Friable Itabirite. These erosions were mainly caused by the occurrence of wave impacts caused by both wind and the flow of vessels, and also by the structural flow of the slope towards the lake in some locations. Alternatives were studied to stop the bank erosion processes, however, due to local morphological and geotechnical conditions, the solution concept evolved to the configuration of a set of solutions: anchored tieback beam to guarantee the stability of the lower portion of the slope, rockfill contained by high-resistance steel mesh to cushion the wave impact and stabilize the erosion processes other than the bank. Due to the flexibility of the structure, it was possible to obtain better conformation of the rockfill layer on the face of the slope, in addition to greater permissibility of the system in the event of wave impacts and movements of the rock blocks, due to the enveloping and anchoring of the system. Through monitoring between the rainy season of 2024-2025, with daily nautical traffic, the solution presented excellent performance in terms of slope protection.

KEYWORDS: protection of slopes, ship-waves, rockfill, flexible mesh.



1. INTRODUÇÃO

Taludes marginais a lagoa ou cursos d'água podem sofrer com erosões (solapamento do pé) ou instabilidades geotécnicas. As primeiras causadas pela velocidade de fluxo junto à margem ou impacto direto de ondas, cujo efeito mecânico promove a remoção das partículas de solo. As instabilidades estão normalmente associadas à variações de nível d'água tanto externo como interno do talude, ocasionando as consequentes alterações de propriedade e tensão total na face, cujo desequilíbrio pode culminar em perda da condição de equilíbrio. Para os taludes escopo deste estudo, foram observadas majoritariamente, durante o acompanhamento das obras e visualização frequente dos taludes, processos erosivos causados pelo impacto mecânico das ondas do lago, geradas tanto pelo vento como pelo deslocamento de embarcações.

Ademais, as informações hidrogeológicas indicam que parte do talude em estudo consiste em região de descarga do aquífero em direção ao lago, e o próprio alinhamento de processos erosivos mais severos com lineamentos geológicos mapeados conduzem a conclusão de que estas forças de percolação também favorecem à ocorrência destes processos de degradação de margem em determinadas regiões do talude. Entretanto, embora seja um aspecto importante e tenha sido considerado no projeto de estabilização como um todo, este artigo não abordará este tipo de mecanismo na avaliação de proteção de margem.

Desta forma, com objetivo de mitigar o avanço dos processos de erosão de margem, foram estudadas soluções para controle, sendo estas: revestimento em concreto projetado, geossintéticos tipo geocélula ou formas têxteis, enrocamento, grampeamento do talude. Entretanto, devido às condicionantes morfológicas e geotécnicas locais, todas as alternativas anteriores foram descartadas tecnicamente, sendo adotado um conjunto de soluções compostas por enrocamento contido por malha de aço de alta resistência associada a uma viga atirantada. Devido à flexibilidade da estrutura foi possível se adequar a condicionante geométrica (elevada inclinação) e se obter melhor conformação da camada de enrocamento sobre a face da encosta, além de maior permissibilidade do sistema para o caso de impactos de ondas e movimentações dos blocos de rocha, devido ao envelopamento e ancoragem do sistema.

O elemento de proteção atingiu seu principal objetivo, que consiste na mitigação da ocorrência de processos erosivos nos locais onde há material friável da margem do lago. Foi realizada a fixação da solução dentro de uma faixa da cota do lago, considerando uma altura da proteção de margem, compatibilizada com a variação possível da cota do lago (seja pela elevação ocasionada no período chuvoso ou por rebaixamento pela retirada da água), conforme dados disponibilizados pelo cliente.

2. APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA

O local escopo deste estudo é composto por taludes artificiais, produtos de atividade minerária pregressa em uma cava de mineração, que também sofreu instabilidades geotécnicas no decorrer de sua história. Esta cava hoje se encontra em processo de descomissionamento e obras de estabilização se encontram em andamento como parte de um plano de fechamento de mina. Os processos variam em diferentes regiões da cava, desde movimentos de massa do tipo planar em rocha até processos erosivos de material friável. Neste artigo apenas o processo de erosão de margem será abordado.

Devido à demanda de transporte de colaboradores e insumos para as obras na região, tem sido utilizado o modal aquaviário, esta ação mais intensa proporcionou a avaliação direta do efeito das ondas nos taludes (antes apenas geradas pelo vento), confirmado que este também é um mecanismo importante nos processos de erosão de margem.

Cabe ressaltar que as alterações geométricas dos taludes em função dos processos erosivos supracitados atuam como agentes deflagradores de movimentos de massa de maior monta, em função do descalçamento do pé dos taludes.

Somada a condição desfavorável supracitada, também deve ser considerada a condicionante geológica, principalmente no que se refere ao material geológico na região da margem e sua orientação estrutural. Para o local, os materiais geológicos que compõe a margem do terreno, consistem em Itabirito Médio e Friável, com bandamento mergulhante na direção do talude na região de estudo.

No que se refere à geometria dos taludes avaliados, podem ser verificadas características como (1) contorno do pé irregular, com avanços ou recuos em relação à margem, gerando falta de uniformidade; (2) pontos com feições “negativas” / cavidades e (3) trechos extremamente verticalizados, com inclinações acima de 60°.



2 0 2 5

Diante deste cenário, durante o período de desenvolvimento de projeto executivo e andamento das obras foi desenvolvido estudo, projeto e implantação de soluções para mitigação do problema erosivo, conforme pode ser observado nas figuras abaixo.

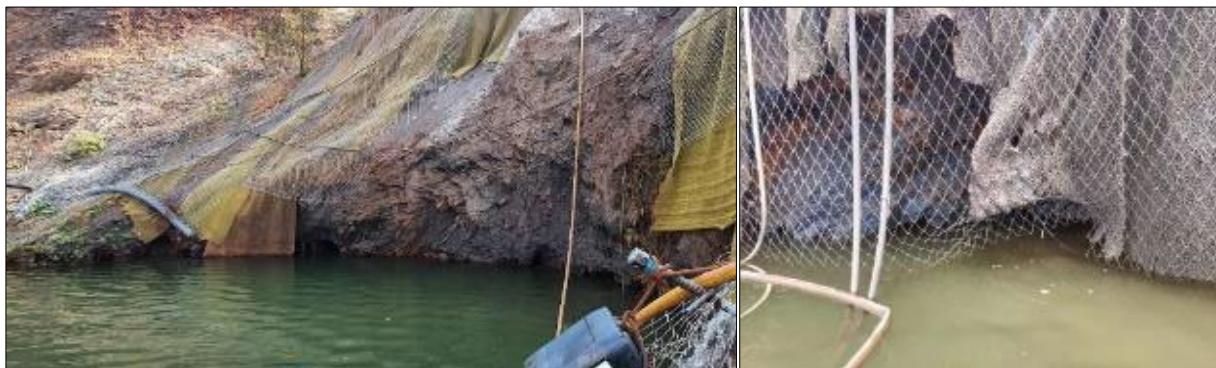


Figura 1: Erosões Margem – Porção Oeste.



Figura 2: Erosões Margem – Porção Oeste.



Figura 3: Erosões Margem – Porção Central e Leste.



Figura 4: Vista Frontal do Talude antes das Intervenções.

3. ALTERNATIVAS ESTUDADAS

Na fase de desenvolvimento de projeto diferentes alternativas de solução foram estudadas. Para isto, foram levadas em consideração a adoção das soluções de (1) formas têxteis planas; (2) camada de enrocamento envelopada por tela metálica de alta resistência e (3) atenuador de ondas.



3.1. Alternativa 01 (Formas Têxtil de Concretagem)

Para a alternativa 01 foi estudada a adoção de forma têxtil de concretagem, cujo material é constituído de dupla camada de tecido sintético, com matéria prima principal em Poliamida e Polietileno. Esta dupla camada é conectada por espaçadores que determinam a espessura do colchão de concreto após seu preenchimento. O sistema pode apresentar seção variável e com alguma flexibilidade e capacidade de moldar-se ao terreno.

Como limitações para esta alternativa destacam-se a (1) dificuldade de contornar erosões e conformação à face do talude, além da (2) necessidade de reforços excessivos para ancoragem da solução devido ao peso próprio da mesma, principalmente em trechos de talude verticalizados, visto que não há apoio para as formas.

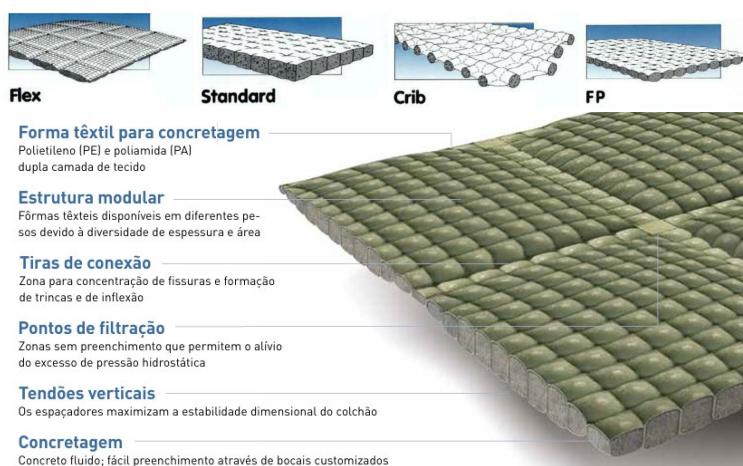


Figura 5: Sistema de formas geotêxteis planas, Huesker (2018).

3.2. Alternativa 02 (Enrocamento Envelopado por Tela Metálica de Alta Resistência)

A alternativa 02, por sua vez, consistiu na adoção de uma camada de envelopamento de blocos de rocha através de “colchão” confeccionado por tela de aço e enrocamento.



Figura 6: Sistema de Enrocamento envelopado por Tela Metálica de Alta Resistência, Geobrugg e Denk, M. (2022).

Como principal fator de atenção, devido ao contato constante da solução com água, há suscetibilidade às patologias relacionadas a corrosão dos fios de aço que compõem a malha metálica. Para o modelo de tela adotado no presente estudo, tem-se como proteção anticorrosiva da superfície do fio a liga de Zinco-Alumínio (Zn-Al).

A galvanização é preferencial aos tratamentos com revestimento, visto que o efeito da proteção catódica é que lesões locais na camada protetora não causam corrosão em um ponto específico, o produto do ataque à liga de Zn-Al é justamente óxido de alumínio, que possui função “cicatrizante” em eventuais trechos danificados da galvanização (Geobrugg e Denk, M., 2022). Isso é contrário aos fios revestidos de plástico,



2 0 2 5

onde danos locais à camada de plástico levam a ataques de corrosão concentrados, por vezes combinados adicionalmente com efeitos de corrosão por fresta, o que resulta em atividades de corrosão ainda mais aceleradas.

3.3. Alternativa 03 (Atenuador de Ondas)

A alternativa 03 se refere a solução de barreira flutuante, que consistem de boias longitudinais, do tipo cortina, com sistema de ancoragem associado. Esta alternativa visa a reduzir a parcela de efeitos erosivos na margem causados pela ação de ondas geradas por embarcações e vento, todavia, não gera quaisquer tipos de barreiras físicas ou proteção na face do talude. A adoção desta solução ainda implica em ondas sobre a face do talude, apesar de ocorrer em magnitudes menores. Ainda, não há proteção contra fluxos subterrâneos advindos dos taludes.

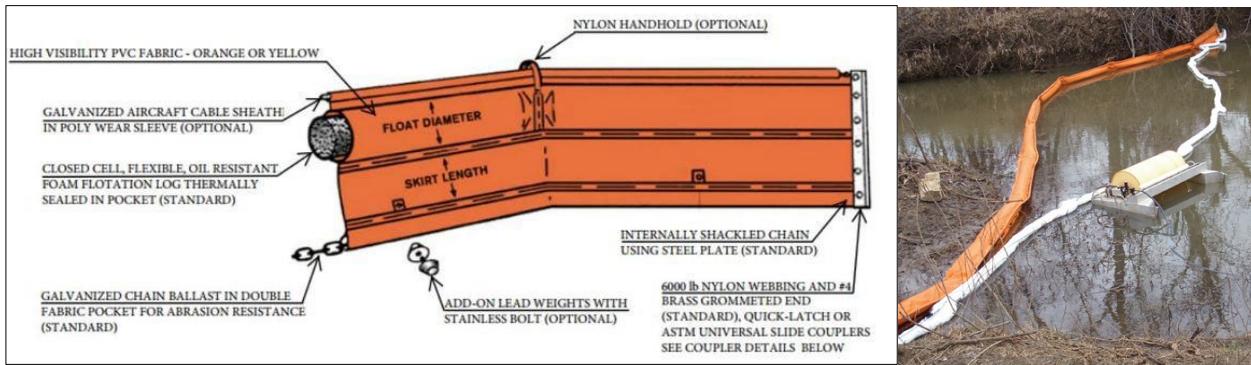


Figura 7: Barreira Tipo Cortina Atenuadora de Ondas, Skimoil.

3.4. Comparativo de Desempenho das Alternativas

Tabela 1: Comparativo Técnico de Alternativas para Proteção de Margem.

	Alternativa Técnica		
	Formas Têxteis Planas	Envelopamento por Tela Metálica	Atenuador de Ondas
Redução de Energia de Ondas	Bom	Bom	Razoável
Contorno do Pé Irregular	Insuficiente	Bom	Insuficiente
Pontos com Cavidades	Insuficiente	Demandar por Reforços	Insuficiente
Trechos Verticalizados	Demandar por Reforços e solução de ancoragem	Bom	Insuficiente

Avaliando-se o desempenho de cada solução, para as principais características a serem contornadas pelas alternativas técnicas, a análise de viabilidade técnica indicou que o uso de envelopamento de blocos por tela metálica foi a solução mais apropriada, dada as irregularidades e falta de uniformidade geométrica dos taludes escopo deste estudo, e as demandas de resistência do sistema para ancoramento, em função da elevada declividade do talude além da presença de trechos verticalizados.

4. PROJETO IMPLANTADO

De forma a aliar a demanda técnica de combate a instabilidades no pé dos taludes, a capacidade requerida de ancoragem do sistema de proteção de margem, as demandas de solicitações tanto de peso próprio quanto de solicitações externas, foi concebido um sistema de proteção de margem composto por:

- Uma viga atirantada posicionada a 3,50m do nível do lago. Esta linha é composta por tirantes com carga de trabalho (ABNT, 2018) de 230kN (Gewi 32mm), comprimento de 15,0 metros e espaçamento de 1,50 metros, composta por concreto armado. Esta solução possui tanto função de composição da solução de proteção, quanto a de elevação do fator de segurança da encosta para estabilização, todavia, esta última não será abordada neste estudo.



2 0 2 5

- “Colchão de Enrocamento” composto por malha de aço de alta resistência T> 150kN/m com fios de 1770Mpa, modelo TECCO G65/3mm (Geobrugg AG, 2021) para garantia da resistência local e capacidade de suporte para sistema ancorado envelopando uma camada de espessura média de 0,3m de enrocamento;

Para garantia de uma espessura uniforme, conforme projeto, foram adotados em trechos pouco inclinados a adoção de gabaritos de aço CA-50, para trechos verticalizados foram utilizados grampos do tratamento de solo grampeado (pregressamente implementado no local, parte do projeto de estabilização do talude). Foram utilizadas balsas auxiliares para transporte e armazenamento dos blocos de rocha. O lançamento dos blocos foi realizado com auxílio de tubos PVC de diâmetro maior. A amarração do envelopamento foi realizada junto ao tratamento previamente implementado de solo grampeado associado a tela metálica, todavia, também é possível a conexão junto viga atirantada, por meio de cabos de aço espiral.

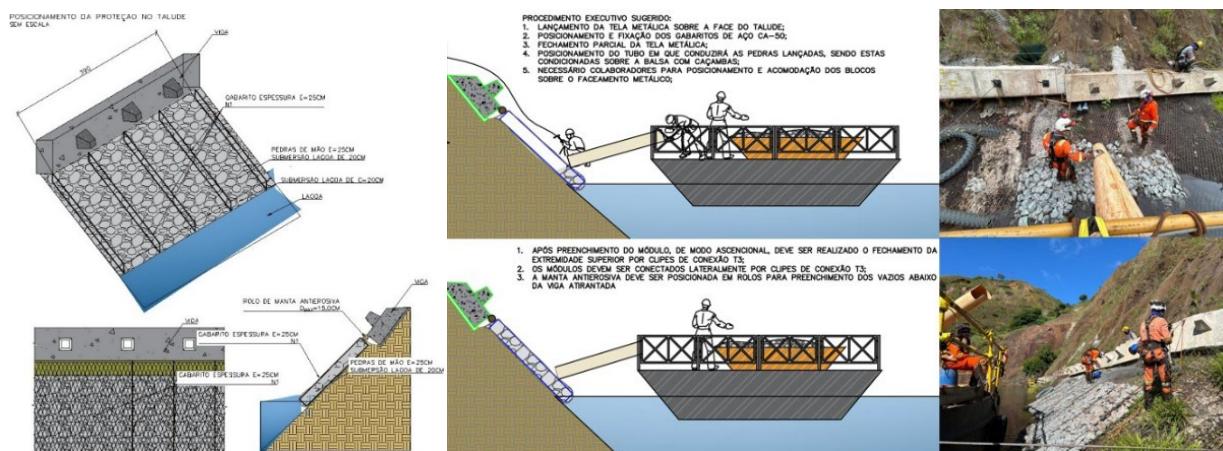


Figura 8: Projeto e Implantação da Solução.



Figura 9: Solução implementada – Porção Oeste.



Figura 10: Solução implementada – Porção Central.



2025



Figura 11: Solução implementada – Porção Leste.

A Figura 12 apresenta um comparativo entre um trecho com a solução já implementada e outro com necessidade de intervenção e previsão de instalação da proteção de margem. Pode ser constatado pelos registros que onde não há envelopamento de enroncamento ocorreu a continuidade dos processos erosivos, avançando diretamente abaixo da viga atirantada, podendo comprometer seu desempenho, por outro lado, no trecho com o sistema de proteção de margem foi observada a paralização dos processos erosivos.



Figura 12: Efetividade da Solução de Proteção de Margem.

5. CONCLUSÕES

A proteção de margem executada teve por objetivo complementar o sistema de estabilização de taludes projetado e fundamentalmente reduzir às erosões de margem geradas pelo impacto da ação das ondulações do lago (originadas pelo vento ou devido a transporte marítimo utilizado no espelho d'água). Mesmo que de pequeno porte, dada as características do material, estas ondas geraram energia suficiente que causam o desprendimento de material e avanço na instabilidade para a região de montante.

O desafio deste projeto de proteção de margem consistiu principalmente nas questões geométricas das margens, pois consistem em taludes escavados em ângulos sensivelmente superiores aos taludes de margens naturais, onde soluções padrão são empregadas (colchão reno, mantas geossintéticas, bioengenharia, etc). A geometria do problema demandou uma resistência tanto de ancoragem do peso próprio como resistência local muito maior do que em outros projetos desta natureza. Estas demandas foram contornadas com uma solução customizada utilizando viga atirantada de concreto (também com função de estabilização do talude, mas não abordada neste artigo), malha de alta resistência, enrocamento, e uma configuração de ancoragem compatível com as solicitações de projeto.

Devido a flexibilidade da estrutura foi possível se obter melhor conformação da camada de enrocamento sobre a face da encosta, além de maior permissibilidade do sistema para o caso de impactos de ondas e movimentações dos blocos de rocha, devido à estabilidade do envelopamento e ancoragem do sistema. Através do monitoramento entre o período chuvoso de 2024-2025, com tráfego náutico diário, a solução apresentou ótimo desempenho quanto a proteção dos taludes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. NBR 5629: Tirantes ancorados no terreno - Projeto e execução. Rio de Janeiro, 2018. 38 páginas.



2 0 2 5

Denk, M. (2022): TECCO®Cell for shore protection against erosion: A comparative assessment of the potential for CO₂-footprint reduction of a new type of engineered solution. Company200 Matthias Denk, St. Gallen, Switzerland.

Geobrugg AG (2021). Technical Data Sheet High Tensile steel wire mesh TECCO G65/3, stainless.

Huesker (2018). Incomat® FLEX 20.118.

Skimoil, <https://www.skimoil.com/containment-boom.html>