

BIOENGENHARIA APLICADA A ESTABILIZAÇÕES GEOTÉCNICAS NA FAIXA DE SERVIDÃO DO MINERODUTO MINAS-RIO

Rodrigo Teodorico ¹; Lucas Figueiredo ²; Anderson Fonini ³; Leonardo Gomes ⁴; Jairo Silva ⁵; Thâmara Filsen ⁶

Resumo – A adoção de um caderno de soluções, apresenta alternativas a serem aplicadas nas ocorrências de pequeno a médio porte na extensão do Mineroduto Minas-Rio da empresa Anglo American, nele são apresentadas técnicas de bioengenharia de solos como forma de garantir a boa técnica, segurança dos projetos, com simplicidade da estrutura, facilidade executiva e também preservação ambiental. A Bioengenharia é um campo da geotecnia que ganha cada vez mais espaço no cenário técnico referente à estabilização de taludes e encostas naturais. As técnicas utilizadas associam o uso de soluções convencionais com materiais naturais, e desta forma o sistema adotado tenha igual eficácia, com custos inferiores além de menor impacto ao meio ambiente quando comparado as soluções tradicionais de engenharia.

Palavras-Chave - Estabilização de Taludes; Bioengenharia; Caderno de soluções.

Abstract – The adoption of a solutions book presents alternatives to be applied in small to medium-sized occurrences in the extension of the Minas-Rio Mineroduto of the Anglo American company, in which soil bioengineering techniques are presented as a way to guarantee good technique, safety of the projects, with simplicity of structure, executive ease and also environmental preservation. Bioengineering is a field of geotechnics that is gaining more and more space in the technical scenario regarding the stabilization of natural slopes and slopes. The techniques used associate the use of conventional solutions with natural materials, and in this way the adopted system is equally effective, with lower costs in addition to less impact on the environment when compared to traditional engineering solutions.

Keywords - Slope Stabilization; Bioengineering; Book of solutions.

¹ Eng. Civ., Anglo American, Santo Antônio do Grama – MG, (31) 98309-0220, rodrigo.teodorico@angloamerican.com

² Eng. Geól. MSc, Anglo American, Belo Horizonte – MG, (31) 98402-2195, lucas.t.figueiredo@angloamerican.com

³ Eng. Civ. DSc, FGS Geotecnia, Porto Alegre – RS, (51) 98175-5555, fonini@fgs.eng.br

⁴ Eng. Civ. MSc, Anglo American, Conceição do Mato Dentro – MG, (31) 98419-1541, leonardo.gomes@angloamerican.com

⁵ Eng. Geól. MSc, Anglo American, Conceição do Mato Dentro – MG, (35) 99897-6779, jairo.silva@angloamerican.com

⁶ Eng. Civ., Anglo American, Conceição do Mato Dentro – MG, (31) 98329-3146, thamara.filsen@angloamerican.com

1. INTRODUÇÃO

O Mineroduto Minas-Rio transporta o minério de ferro extraído na Mina da Serra do Sapo, em Conceição do Mato Dentro - MG, para o Porto do Açu, no município de São João da Barra - RJ, compreendendo 528 Km. Ao longo de sua trajetória linear, o Mineroduto intercepta, e ou, tangência estruturas permanentes, encostas naturais, passagens aéreas, vales e rios, passando por mais de 30 municípios, com diferentes contextos geológico-geotécnicos e, conseqüentemente, diferentes mecanismos de falha predominantes. A Figura 1 mostra a macro divisão realizada, de acordo com diferentes aspectos em termos de litologia, pedologia e geomorfologia, principalmente.

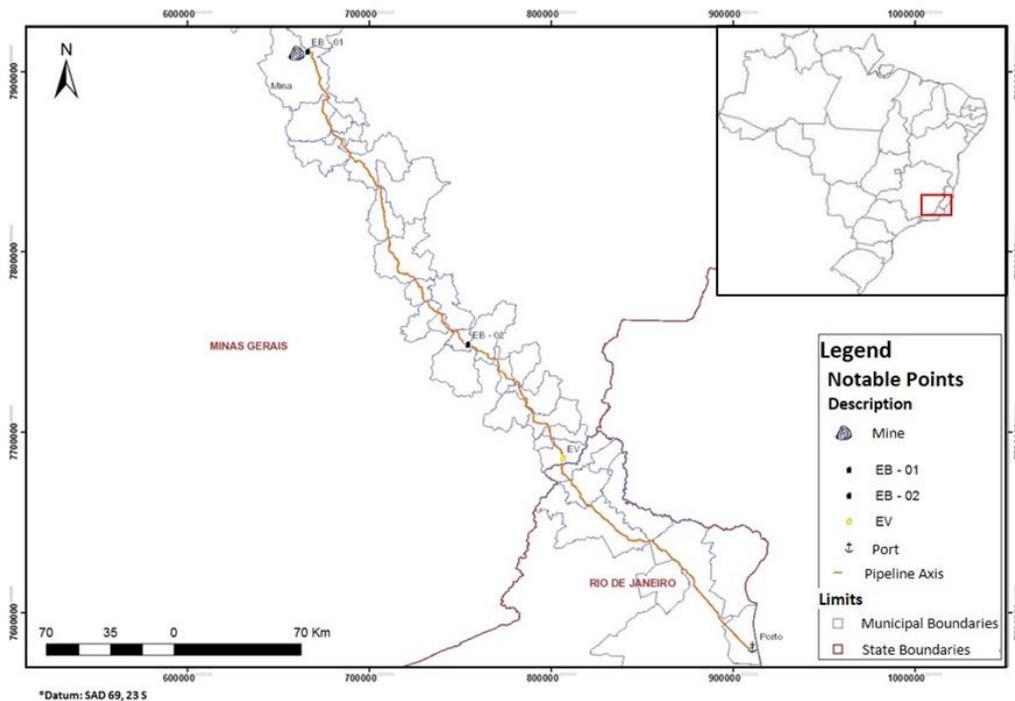


Figura 1: Mapa com a trajetória do Mineroduto Minas-Rio

As limitações impostas ao traçado na implantação do Mineroduto foram, em boa parte, responsáveis pela geração de uma faixa de domínio nas quais os inventários robustos de talude em corte requerem grandes esforços de monitoramento e manutenção, a fim de garantir a segurança operacional.

A restrição de espaços físicos e a construção de empreendimentos, significativamente mais complexos, elevaram a demanda por taludes aumentando a necessidade do entendimento de métodos analíticos, ferramentas de investigação e métodos de estabilização. Essas demandas devem-se a estabilidade de um talude estar diretamente relacionada a associação de sua geometria com os parâmetros de resistência dos materiais geotécnicos que o compõe.

Por se tratar de uma estrutura com tamanha extensão e com uma enorme diversidade de contextos geológico-geotécnicos e socioambientais, é essencial estabelecer uma hierarquia entre todas as estruturas geotécnicas ao longo do Mineroduto Minas-Rio. Essa hierarquia é a base para se determinar estratégias e priorização de análises de risco, avaliações geotécnicas mais aprofundadas para adoção de ações de monitoramento e manutenção corretas.

2. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA ESTUDADA

2.1. Gestão de riscos geotécnicos operacionais

A matriz de risco da Anglo American, classifica a priorização de risco e os eventos indesejados prioritários, focados principalmente nos pontos notáveis, incluindo critérios de avaliação de probabilidade e consequência (danos às pessoas, segurança ocupacional, impactos ambientais, impactos sociais, impactos regulatórios, perdas materiais e impactos de reputação). A elaboração vem da Gestão de Riscos Operacionais (ORM) que é uma metodologia para lidar com riscos no ambiente operacional, padronizada para todas as unidades de negócio da Anglo American em todo o Mundo.

MATRIZ DE RISCO ANGLO AMERICAN PLC		Efeito/Consequência da condição perigosa (considerar a consequência potencial máxima razoável do evento)				
Tipo de Impacto ("Tipos de Impacto" adicionais podem existir em um evento. Identifique-os e classifique-os adequadamente)		1. PEQUENO	2. BAIXO	3. MÉDIO	4. ALTO	5. MAIOR
(S) Dano às Pessoas - Segurança		Caso de primeiros socorros	Caso de tratamento médico	Afastamento	Invalidez permanente ou fatalidade única	Múltiplos casos de invalidez permanente ou múltiplas fatalidades
(H) Dano às pessoas - Saúde ocupacional		Exposição a perigo de saúde resultando em um pequeno descolôro	Exposição a perigo de saúde resultando em sintomas que exigem intervenção médica e recuperação completa (sem afastamento)	Exposição a perigos de saúde/agentes (acima do LT) resultando em impacto reversível sobre a saúde (com afastamento) ou mudança permanente sem invalidez ou perda de qualidade de vida	Exposição a perigos de saúde/agentes (significativamente acima do LT) resultando em impacto irreversível sobre a saúde, com perda de qualidade de vida (invalidez permanente) ou fatalidade única	Exposição a perigos de saúde/agentes (significativamente acima do LT) resultando em impacto irreversível sobre a saúde, com perda de qualidade de vida de um grupo/população numerosa ou múltiplas fatalidades
Impacto ambiental		Durando dias ou menos; limitado a uma área pequena (metros); receptor de baixa importância/sensibilidade (área industrial)	Durando semanas; área reduzida (centenas de metros); espécies/habitat não ambientalmente sensível	Durando meses; impacto sobre uma área ampla (quilômetros); área com alguma sensibilidade ambiental (ambiente escasso/valioso)	Durando anos; impacto na sub-bacia; ambiente sensível do ponto de vista ecológico/receptor (espécies/habitats ameaçados)	Impacto permanente; afete toda uma bacia ou região; ambiente altamente sensível (espécies ameaçadas; áreas pantanosas, habitats crustáceos)
(C) Impacto Social/Na Comunidade		Pequena interferência na cultura/estruturas sociais	Alguns impactos na população local; predominantemente reparáveis. Reclamação de uma única parte interessada no período de análise	Problemas sociais contínuos. Reclamações isoladas de membros da comunidade/partes interessadas	Impactos sociais significativos. A comunidade organizada protesta ameaçando a continuidade das operações	Impactos sociais amplos e relevantes. A reação da comunidade afeta a continuidade do negócio. "Licença de operação" em risco
(L&R) Legal & Regulatório		Não conformidade técnica. Nenhum alerta recebido; nenhum relatório regulamentar exigido	Violação dos requisitos regulamentares; relatório/envolvimento da autoridade. Gera multa administrativa	Pequena violação da lei; relatório/investigação da autoridade. Atrai indenização/sanção/eslização executória	Violação da lei; pode atrair processo criminal contra o Co. Operacional ou/ou Diretor/Dir. E sanção/eslização executória. Licença individual temporariamente revogada	Violação significativa da lei. Apêes individuais ou de classe; processo criminal contra a Empresa, Diretores/gerentes. Processos contra a matriz; licença de operação substancialmente modificada ou retirada
(M) Perdas Materiais/Danos/Interrupção do Negócio		< 0,01% da Receita Anual/Total do Ativo	0,01 - 0,1% da Receita Anual/Total do Ativo	0,1 - 1,0% da Receita Anual/Total do Ativo	1 - 5% da Receita Anual/Total do Ativo	> 5% da Receita Anual/Total do Ativo
(R) Impacto na reputação		Impacto pequeno; conscientização/preocupação de indivíduos específicos	Impacto limitado; preocupação/reclamações de determinados grupos/organizações (por ex. ONGs)	Impacto local; preocupação pública/publicidade negativa localizada nas comunidades vizinhas	Suspeita de dano à reputação; preocupação/reação pública local/regional	Dano à reputação evidente; atenção/especulacão pública nacional/internacional
Probabilidade	Considerando a presença e magnitude do perigo e a exposição a esse perigo (número de pessoas e frequência de tarefas que expõem essas pessoas), assim como o status dos controles existentes.	CLASSIFICAÇÃO DE RISCO				
5 (Quase Certo)	O evento indesejado ocorreu frequentemente, ocorre uma ou mais vezes por ano e é provável que volte a acontecer em 1 ano	11 (M)	16 (S)	20 (S)	23 (A)	25 (A)
4 (Provável)	Um evento indesejado ocorreu com pouca frequência; ocorre menos de uma vez por ano e é provável que volte a acontecer em 5 anos	7 (M)	12 (M)	17 (S)	21 (A)	24 (A)
3 (Possível)	O evento indesejado aconteceu no negócio em algum momento; ou poderia acontecer entre 5 e 10 anos	4 (B)	8 (M)	13 (S)	18 (S)	22 (A)
2 (Improvável)	O evento indesejado aconteceu no negócio em algum momento; ou poderia acontecer entre 10 e 20 anos	2 (B)	5 (B)	9 (M)	14 (S)	19 (S)
1 (Raro)	Nunca se soube da ocorrência do evento indesejado no negócio; ou é altamente improvável que irá ocorrer nos próximos 20 anos	1 (B)	3 (B)	6 (M)	10 (M)	15 (S)

Tabela 1: Matriz de Risco Anglo American PLC.

2.2. Critérios de seleção

A etapa de aquisição das informações nos taludes ocorre de maneira conjunta avaliando-se simultaneamente a tipologia litológica, as características estruturais e os fatores externos chegando à Classificação do Maciço, seja ele rochoso, terroso ou misto.

A partir da Classificação do Maciço verifica-se o Modo de Ruptura do talude ou encosta que, em conjunto com as evidências de instabilidade eventualmente verificadas, convergem para as possíveis soluções de estabilização.

Após a obtenção do fator de segurança através da metodologia apresentada, é necessário fazer uma comparação direta com o valor indicado pela norma brasileira de Estabilidade de Encostas (NBR 11682), conforme Figura 2.

Nível de segurança contra danos materiais e ambientais \ Nível de segurança contra danos a vidas humanas	Alto	Médio	Baixo
	Alto	1,5	1,5
Médio	1,5	1,4	1,3
Baixo	1,4	1,3	1,2

Figura 2: Matriz de fatores de segurança mínimos adotados em taludes (NBR 11682, 2009).

Para aplicação do caderno de solução nos taludes do Mineroduto é feita inspeção de campo e através da descrição e diagnóstico da situação dos locais (evidência de instabilidade; perda de geometria; drenagem superficial inadequada; proteção superficial adequada, etc.), foram determinadas as faixas de alturas correspondentes aos taludes a serem estabilizados, ressalta-se ainda algumas características executivas:

- Locais com menor requerimento de maquinário e movimentação de terra;
- Possibilidade de utilização de materiais naturais e locais;
- Desenvolvimento e melhorias das soluções tradicionais;

A intervenção escolhida deve ser adequada ao tratamento do problema, mostrando-se suficiente no controle dos fenômenos envolvidos no caso que a demande, e deve ter relação custo-benefício compatível com a realidade econômica do empreendimento e disponibilidade de mão de obra.

2.3. Caracterização geológica

A área de estudo se inicia na Serra do Espinhaço, percorre por sequências metassedimentares, como: Complexo Guanhões, Rios das Velhas / Suíte Borrachudos, Mantiqueira, Juiz de Fora, Paraíba do Sul e finaliza no litoral Fluminense nas sequências sedimentares da Formação Barreiras.

2.4. Caracterização geotécnica

De acordo com as macrounidades geológica-geotécnica, há uma maior concentração de solo residual e coluvionar, além de rocha. Quanto à topografia, os taludes podem apresentar geometria verticalizada, sujeitos a ação de fatores externos, e conseqüentemente, podendo deflagrar movimentos de massa superficiais a profundos.

3. HISTÓRICO DE EVENTOS

As lições aprendidas de eventos ocorridos são uma prática essencial para a melhoria contínua. Portanto, é importante fazer registros e compilação de eventos nas estruturas ao longo do Mineroduto e seus possíveis mecanismos de falha.

Os eventos englobando movimentação de massa ocorridos ao longo do Mineroduto foram de fundamental importância para a criação do caderno de soluções aqui apresentado, não só como forma de aprimoramento do acervo técnico e soluções já existentes, mas como um meio de inovação de novas técnicas de estabilização.

Na figura 3 abaixo é apresentado amostragem de evento ocorrido ao longo da faixa domínio do Mineroduto e aplicação do Caderno de Soluções.

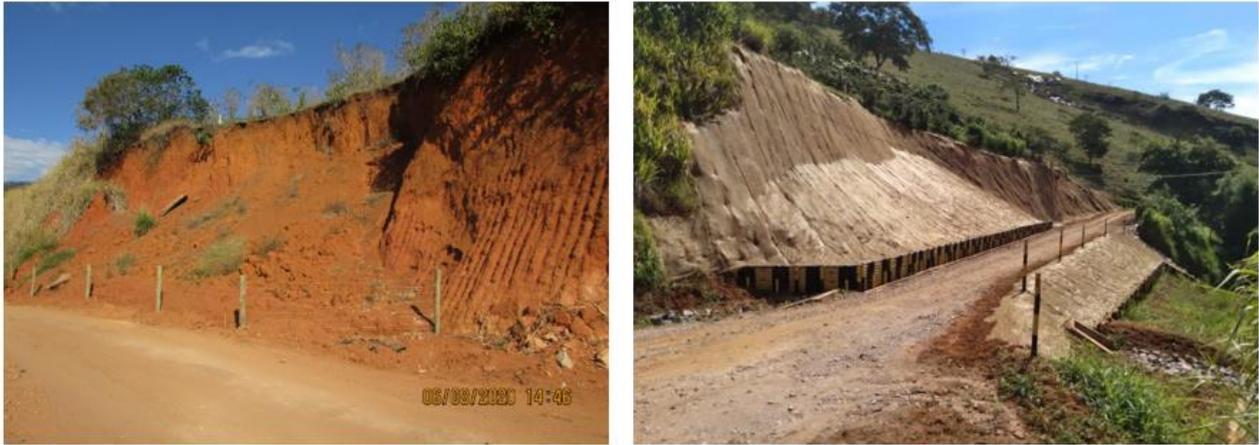


Figura 3: Escorregamento e estabilização de talude utilizando Bioengenharia km 265+440 m.

4. CADERNO DE SOLUÇÕES

Em virtude da necessidade de intervenções desenvolveu-se alternativas técnicas baseadas em bioengenharia para os taludes adjacentes ao Mineroduto Minas-Rio. Buscaram-se soluções que tivessem como premissas básicas a simplicidade de execução e a utilização de materiais locais e biodegradáveis. Além destas características, deve-se ressaltar versatilidade na execução e adequação à topografia do terreno, entre outros.

Em 2001, o Washington State Transportation Center (TRAC) publicou alguns estudos de caso em que realizou análises de custo-benefício de técnicas de estabilização de taludes baseadas em bioengenharia. Constatou-se que o custo de implantação de uma solução de estabilização de talude baseada em bioengenharia é inferior a uma solução convencional, quando se dispõe dos insumos necessários no local ou nas proximidades. Estima-se que a redução do custo seja em média, entre 25% a 40% em relação a soluções convencionais.

4.1. Soluções elencadas

Para o amplo atendimento dos taludes a serem estabilizados ou, somente reconformados, após um extenso estudo acerca das metodologias disponíveis, elegeu-se como técnicas que comporiam o caderno de soluções paredes Krainer, paliçadas e grades vivas.

Parede Krainer são estruturas compostas por peças de madeira organizadas de forma a criar caixas, as quais são preenchidas com material local fazendo com que a estrutura adquira rigidez e peso. Elas podem ser utilizadas para a recomposição de erosões profundas ou para a estabilização de taludes.

Entre as vantagens desse tipo de estrutura estão a sua elevada tolerância a recalques diferenciais, comportamento parcialmente drenante, versatilidade na execução e adequação à topografia do terreno, acabamento estético flexível arquitetonicamente, entre outros. A Figura 4 mostra um exemplo desse muro executado em combinação com outros elementos paisagísticos.



Figura 4: Exemplo ilustrativo de parede Krainer (Souza, 2017).

Também destinado a estabilização de taludes e recomposição de processos erosivos, porém em escala menor quando comparados as situações passíveis de aplicação de paredes Krainer, admitiu-se o uso de paliçadas. Estas estruturas de contenção têm como características básicas um paramento delgado, sendo uma porção dele inserida no solo, podendo contar ou não com linhas de ancoragens. A Figura 5 mostra um exemplo dessa estrutura de contenção executada com toras.



Figura 5: Paliçada executada com toras de eucalipto.

Por fim, grades vivas foi a solução adotada para a recomposição de locais onde ocorreram rupturas ou processos erosivos superficiais. Estas estruturas são empregadas para a proteção de taludes de médias a baixas inclinações, onde um reticulado de vigas e estacas de madeira são executados na face do talude. Uma das vantagens dessa solução é a rápida integração ao meio local, o que a torna rapidamente imperceptível. A Figura 6 mostra um exemplo desse tipo de solução.



Figura 6: Exemplo ilustrativo de Grade viva (AIPIN, 2002).

4.2. Dimensionamento

Os dimensionamentos foram apoiados na bibliografia técnica disponível e também em boas práticas de engenharia.

O dimensionamento das paredes Krainer baseou-se na premissa de que esta estrutura se comporta como um muro rígido e monolítico, desprezando-se a influência entre o material de preenchimento do muro e as vigas ou entre as vigas e o solo no tardo do muro. Além disso, realizou-se a verificação estrutural das vigas submetidas a esforços de cisalhamento e flexão, apresentando-se como um procedimento de cálculo análogo a um muro de gravidade. A Figura 7 apresenta planilha de entrada de dados, análise e dimensionamento da parede Krainer.

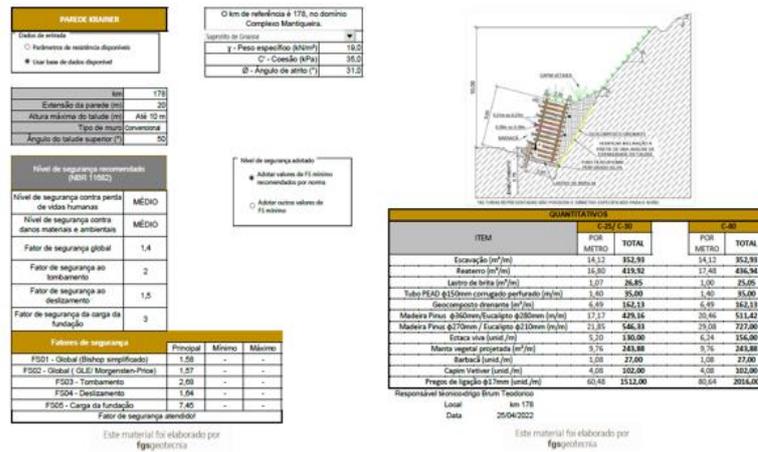


Figura 7: Planilha de cálculo de estrutura de contenção tipo parede Krainer.

Para a determinação dos fatores de segurança utilizou-se como referência a NBR 11682 (NBR, 2009), que versa sobre estabilidade de taludes e encostas. Esta determina que, para muros de gravidade, o dimensionamento deve atender à verificação de tombamento, deslizamento e capacidade de carga da fundação. A Tabela 2 indica os fatores de segurança estabelecidos pela norma, conforme o modo de ruptura.

Tabela 2. Índices físicos e parâmetros de resistência dos solos investigados.

Verificação de segurança	FS
Tombamento	2,0
Deslizamento na base	1,5
Capacidade de carga da fundação	3,0

Já no caso das paliçadas, adotou-se a metodologia que considera esta estrutura como um elemento estrutural rígido, onde sua estabilidade provém apenas por meio de sua ficha (fundação) ou então pela combinação da ficha e de um nível de ancoragem.

Dependendo das condições de estabilidade necessárias, bem como, da altura e do tipo de solo, pode haver variações na sua geometria para que o fator de segurança mínimo seja alcançado. Os elementos estruturais das paliçadas podem ser dispostos com predominância no sentido vertical, na horizontal, ou uma combinação de ambos. A Figura 8 apresenta planilha de entrada de dados, análise e dimensionamento das Paliçadas.

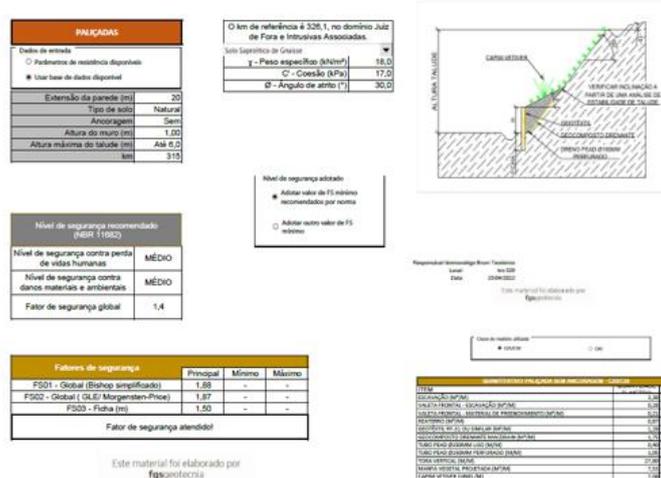


Figura 8: Planilha de cálculo de Paliçada.

Por fim, para o dimensionamento das grades vivas adaptou-se metodologias propostas visando determinar os esforços exercidos pelo solo contido em cada célula para a quantificação das forças atuantes nas estacas que sustentam e fixam a estrutura no terreno. Essa metodologia possui diversas simplificações, todavia possibilita considerar diferentes inclinações de taludes e parâmetros de resistência do solo na determinação da geometria da solução.

4.3. Resultados

O processo de definição das geometrias adotadas nas paredes Krainer e nas paliçadas considerou uma série de análises de fatores de segurança locais e globais, de acordo com o processo de dimensionamento.

Para contemplar inúmeras características possíveis dos locais de implantação, foram realizadas variações de peso específico, ângulo de atrito interno e coesão dos solos envolvidos nas soluções. Concomitantemente, realizou-se variação da inclinação e altura dos taludes analisados.

A partir disso, escolheu-se soluções visando contemplar as características dos solos possíveis nos locais de implantação, de forma a adaptar contenções mais robustas em locais com situação menos favorável e muros menos robustos para taludes com materiais mais competentes e/ou geometria menos suscetível a movimentação. As diferentes geometrias escolhidas permitem que os fatores de segurança não sejam demasiadamente exagerados ao mesmo tempo que atendem as normas de dimensionamento.

Para as paredes Krainer foram estabelecidas cinco geometrias, variando de 4,0 m a 8,0 m de altura, adotando diferentes larguras. A Figura 9 apresenta duas imagens de uma das soluções projetadas.

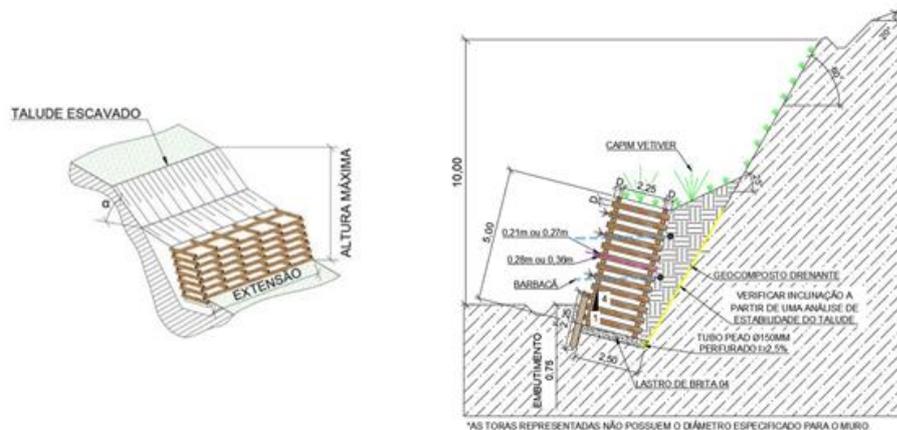


Figura 9: Muro convencional de 5m

A solução com paliçadas sem ancoragem adotou como altura do paramento 1,0m, 1,5 m e 1,75 m. Já aquelas com um nível de ancoragem, o paramento foi fixado em 1,75 m e 2,25 m, podendo a ancoragem ser interna ou externa a estrutura. A Figura 10 apresenta seções tipo das paliçadas sendo: a) sem ancoragem, b) com ancoragem externa e c) com ancoragem interna.

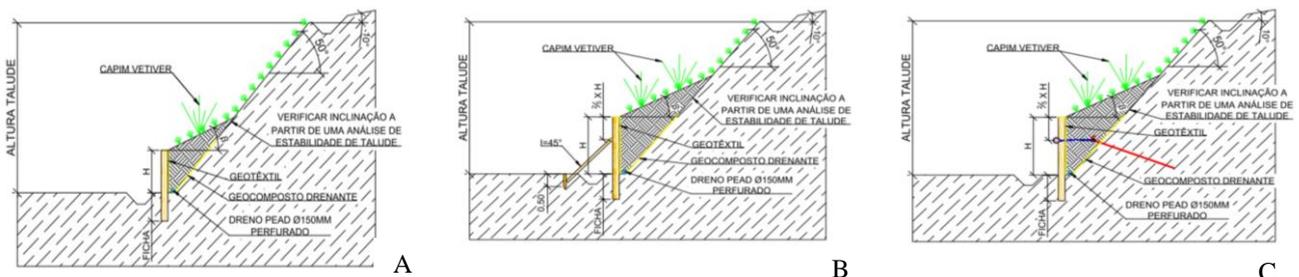


Figura 10: Seções tipo das paliçadas: a) sem ancoragem b) com ancoragem externa e c) com ancoragem interna.

7. REFERÊNCIAS

Anglo American. Report RL-1401-17-30001, Mineroduto Minas-Rio - Gestão de Riscos Geotécnicos – Pontos Notáveis;

ABRAMSON, Lee W.; LEE, Thomas S.; SHARMA, Sunil; BOYCE, Glenn M. 2002. Slope Stability and Stabilization Methods. John Wiley & Sons, Inc. New York. 2nd ed.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT NBR 11.682. Estabilidade de Encostas, 2009. 33 páginas. Rio de Janeiro.

BVP, 20191. Report RL-1000-17-55308: Diagnóstico Geotécnico de Taludes;

DUNCAN, J. Michael; WRIGHT, Stephen G.; BRANDON, Thomas L. 2014. Soil Strength and Slope Stability. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.

FGS. Report RL-1401-17-55910: Relatório Técnico de Contenção com Paliçada

FGS. Report RL-1401-17-55911: Relatório Técnico de Dimensionamento de Parede Krainer

FGS. Report RL-1401-17-55912: Relatório Técnico de Contenção com Grade Viva

FGS. Report RL-1401-17-55913: Relatório Técnico de Taludes

HOEK, E.; BRAY, J. W. Rock slope engineering. London: Institute of Mining and Met., 1981.

LAMBE, T. William; WHITMAN, Robert V (1979). Soil Mechanics, SI Version John Wiley & sons.

AIPIN (2002). Regolamento per l'attuazione degli interventi di Ingegneria Naturalistica nel Territorio della Regione Campania. Italia.

DEFLORE (2019). Disponível em: <<http://www.deflore.com.br>>. Acesso em 17 de fevereiro de 2020.

GROUND STRUCTURES (2020). RETAINING WALLS. Disponível em: <<http://www.groundstructures.co.nz/retaining-walls/>>. Acesso em 17 de fevereiro de 2020.

SOUZA, R. Técnicas de engenharia natural como ferramenta de RAD. In: SIMPÓSIO NACIONAL RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS: REVENDO PRINCÍPIOS / VALIDANDO CONCEITOS, 11., 2017, Curitiba. Apresentação... Curitiba: Sociedade Brasileira de Recuperação de Áreas Degradadas, 2017.

MARTINHO, Pedro Rubens Marques (2005). Contribuição para o estudo de técnicas de Engenharia Biofísica: grade de vegetação e grade de vegetação Vesúvio. Trabalho de Fim de Curso. 96 páginas.

WASHINGTON STATE TRANSPORTATION CENTER – TRAC (2001). Soil Bioengineering For Upland Slope Stabilization. Seattle. 52p.