

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2024/212

Estudo de Caso de Recuperação de Erosão em Talude a Jusante de Britador Primário

Cissa Lopes Lanna

Engenheiro de Minas, Vale, Nova Lima, Brasil, cissa.lanna@vale.com

Tadeu Andrade de Matos

Engenheiro Civil, Geocoba, Rio de Janeiro, Brasil, tam@geocoba.com

Guilherme Isidoro Martins Pereira

Engenheiro Civil, Geocoba, Rio de Janeiro, Brasil, gip@geocoba.com

Eduardo Antonio Gomes Marques

Geólogo, UFV, Viçosa, Brasil, emarques@ufv.br

Christiano Alves Nogueira

Geólogo, Vale, Nova Lima, Brasil, christiano.nogueira@vale.com

RESUMO: Garantir a estabilidade de taludes e sua segurança geotécnica é essencial nos taludes de mineração para minimizar os riscos relacionados à segurança de pessoas e de equipamentos operacionais, bem como os riscos econômicos. Sendo assim, o presente artigo tem como objetivo apresentar um estudo de caso de um projeto de recuperação das erosões e reestabelecimento da drenagem de um talude localizado a jusante das instalações industriais de um britador primário em uma mina de ferro localizada no Quadrilátero Ferrífero. O desafio desse projeto está relacionado às condições de contorno, havendo uma limitação para corte na crista do talude de 7 metros em função das instalações da britagem primária e, a jusante, de acesso para o túnel de britagem e sump, fazendo com que as soluções geotécnicas mais comuns de estabilização de taludes, como retaludamento e contrapilhamento não pudessem ser aplicadas de forma isolada, tendo sido necessário a aplicação de soluções de engenharia de contenção e reforço de talude. Dessa forma, a solução encontrada nesse projeto é mista, contemplando retaludamento de crista, execução de solo grampeado e construção de aterro sem controle de compactação associado a um muro de peso em seu pé para conter a saia do aterro, limitada pelo sump a jusante, bem como a execução de sistema de drenagem. Importante ressaltar que se manteve outra premissa importante do projeto, a reconstituição de bermas essenciais para a manutenção dos taludes, imputando-se critérios geométricos às estruturas.

PALAVRAS-CHAVE: Estabilidade de taludes, erosão, contenção, reforço, mineração.

ABSTRACT: Ensuring slope stability and geotechnical safety is essential in mining slopes to minimize risks related to the safety of people and operating equipment, as well as economic risks. Therefore, this article aims to present a case study of a project for the recovery of erosion and reestablishment of the drainage of a slope located downstream of the industrial facilities of a primary crusher in an iron ore mine located in Quadrilátero Ferrífero. The challenge of this project was the boundary conditions, with a upstream limitation of 7 meters of crest cutting due to the primary crushing facilities and, downstream, access to the crushing tunnel and sump, so that the most common geotechnical solutions for slope stabilization, such as re-sloping and counterpiling, could not be applied separately. It is necessary to apply engineering solutions for containment and slope reinforcement. Thus, the solution found in this project is mixed, contemplating re-sloping of the crest, execution of soil nailing and construction of dump without compaction control associated with a weight wall at its foot to contain the dump toe, limited by the sump downstream, as well as the execution of a drainage system. It is important to emphasize that another important premise of the project was maintained, as the reconstitution of berms essential for the maintenance of the slopes, imputing geometric criteria to the structures.

KEYWORDS: Slope stability, erosion, containment, reinforcement, mining

1 INTRODUÇÃO

A engenharia geotécnica desempenha um papel de enorme relevância em empreendimentos minerais e civis, sobretudo em projetos de taludes (Silva, 2010). Segundo Silva (2010), a crescente importância que a estabilidade de taludes em solos e rochas possui atualmente, deve-se às dimensões cada vez mais significativas impostas para escavações mineiras em lavra a céu aberto, bem como aos grandes cortes necessários em projetos ferroviários e rodoviários de grande porte.

Garantir a estabilidade de taludes e sua segurança geotécnica é essencial nos taludes de mineração e de obras civis para minimizar os riscos relacionados à segurança de pessoas e de equipamentos operacionais, bem como os riscos econômicos.

O presente artigo tem como objetivo apresentar um estudo de caso de um projeto de recuperação das erosões e reestabelecimento da drenagem de um talude localizado a jusante das instalações industriais de um britador primário em uma mina de ferro localizada no Quadrilátero Ferrífero (Figura 1). O projeto de recuperação do talude do Britador Primário tem como finalidade a garantia de que as áreas do platô do britador primário tenham segurança de estabilidade após o escorregamento ocorrido, e seus fluxos de escoamento sejam devidamente direcionados, corrigindo processos erosivos existentes e prevenindo o surgimento de novos.



Figura 1. Localização do Talude Erodido.

As soluções mais comuns de engenharia para a estabilização do talude são retaludamento ou contrapilhamento. Porém, neste caso, as condições de contorno impossibilitaram a utilização isolada de uma dessas soluções. Isto porque o limite horizontal máximo de corte para recorrência do talude era de 7 metros, em função da proximidade da praça da britagem primária e da área de manobra dos autônomos. Além disso, havia também uma limitação de área para contrapilhamento, em função da existência de um acesso importante para a mina e de um sump que também não poderia ser relocado, como mostrado na Figura 1.

É importante também destacar que a configuração final do talude deveria atender a um fator de segurança mínimo de 1,50 para uma eventual ruptura global e 1,30 para uma ruptura inter-rampa, conforme preconizado pela Norma Brasileira NBR 11.682/2009 – Estabilidade de Encostas, e Norma Brasileira NBR 13.029/2017 - Elaboração e Apresentação de Projeto de Disposição de Estéril em Pilha e atendendo também aos critérios de aceitabilidade propostos por Read & Stacey (2009).

Por fim, ressalta-se a necessidade da reconstituição de bermas essenciais para a manutenção dos taludes, sendo essa uma premissa geométrica de projeto.

2 GEOLOGIA LOCAL

A Mina situa-se no flanco sudeste do Sinclinal Ouro Fino que corresponde a uma estrutura dobrada e redobrada, apresentando em planta um aspecto de um bumerangue e em corte transversal numa estrutura sinformal, com o flanco oeste normal e leste invertido (Fonseca, 2014).

A mineralização ocorre sobre litologias do Grupo Itabira, representado apenas pelas rochas itabiríticas e hematíticas da Formação Cauê, praticamente recobertas por espessas coberturas de cangas estruturais (in situ) e detríticas. A geologia estrutural da região da mina é bastante complexa, encontrando-se fortemente dobrada por gerações distintas de eventos deformacionais, causando duplicação e espessamento de camadas (Franco, 2003), o que explicaria a ocorrência de furos de sondagem realizados dentro da cava, com mais de 500m de profundidade e sem sair do horizonte itabirítico (Fonseca, 2014).

A Mina apresenta um arcabouço formado por uma série de horizontes característicos, geralmente, iniciando-se na superfície por um pacote de itabiritos bastante hidratados (goethíticos a anfíbolíticos), que migram para uma unidade silicosa, friável e não hidratada, que se sobrepõe a itabiritos compactos, em contato brusco ou gradativo. É muito comum a presença de diques de rochas máficas, alterados e argilosos concordantes e discordantes. Níveis mais ricos em ferro – hematíticos – também podem ocorrer. Abaixo dessa sequência ferruginosa – Formação Cauê – encontram-se as rochas pelíticas da Formação Batatal, os quartzitos da Formação Moeda e quartzitos da Formação Maquiné (Vaz de Melo e Seabra, 2000).

3 PERFIL GEOLÓGICO GEOTÉCNICO E PARÂMETROS

Para a caracterização do maciço do Talude do Britador, foi considerado o mapeamento geológico-geotécnico e as correlações dos materiais encontrados nas sondagens na área do britador com os ensaios realizados nas demais áreas da cava. No talude do britador primário, objeto deste estudo, foram identificados no mapeamento geológico geotécnico dois litotipos: itabirito e filito. O itabirito foi dividido em duas classes, de acordo com a sua resistência: R2+ e R3. Além destes litotipos, foram identificados: saprólito de itabirito, solo residual de itabirito, canga laterítica estruturada e colúvio (Figura 2). Os contatos entre as unidades mapeadas foram inferidos, haja visto que não foram identificados em campo.

Os parâmetros geotécnicos utilizados nas simulações consideram os valores que se apresentam na Tabela 1, os quais foram definidos com base nos resultados das sondagens a percussão, nos resultados dos ensaios de cisalhamento direto e na experiência da equipe de projeto.

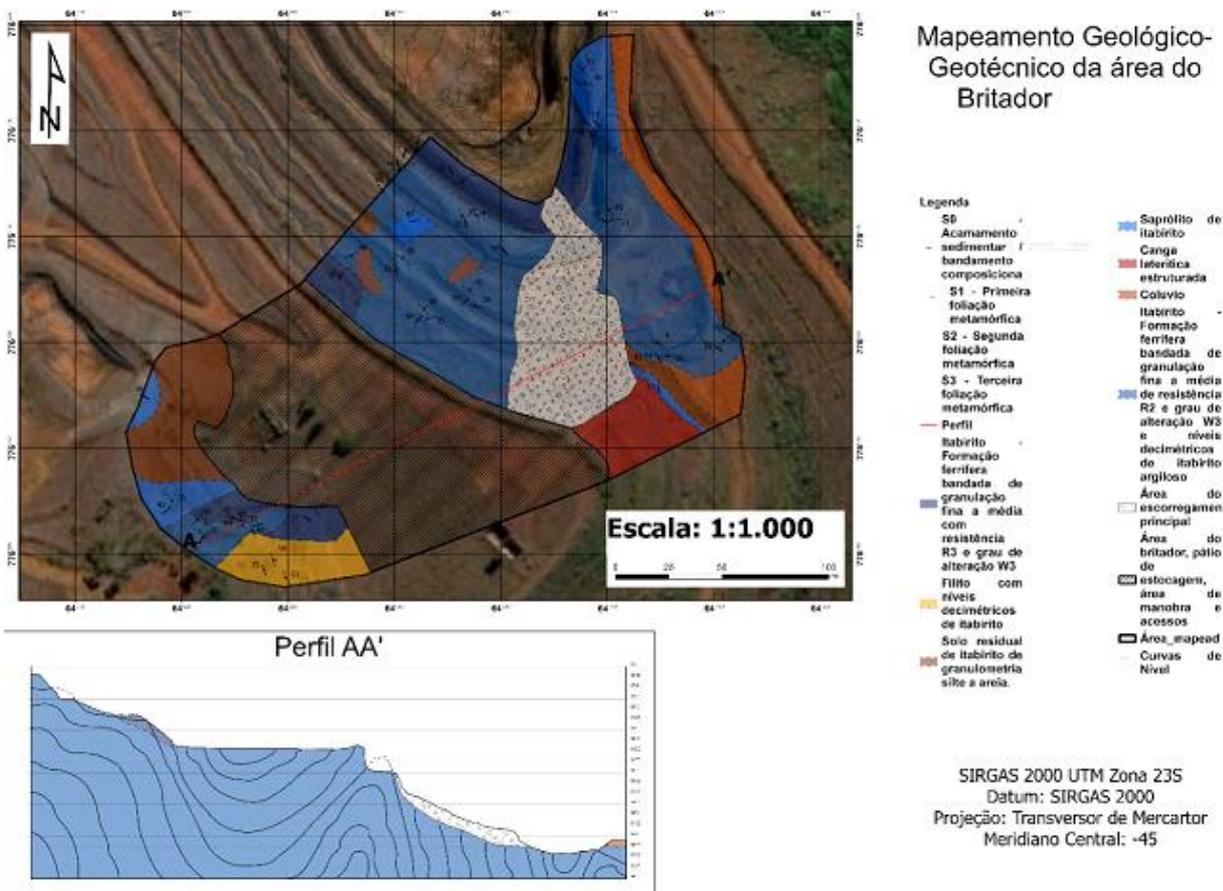


Figura 2. Mapeamento Geológico-Geotécnico da área do Talude Erodido.

Tabela 1. Parâmetros adotados nas análises.

Material	Peso Específico γ (kN/m ³)	Coesão Efetiva c' (kPa)	Ângulo de Atrito Efetivo ϕ' (°)
Itabirito Friável Rompido	28	4	28
Itabirito Friável	28	24	36
Itabirito Médio	35	61.8	39
Itabirito Duro	36	168	43
Estéril	17	8	25

4 DEFINIÇÃO E DIMENSIONAMENTO DAS INTERVENÇÕES

Considerando-se todos os critérios e premissas apresentados anteriormente, o projeto de estabilização do Talude do Britador consistiu no retaludamento da crista do talude através de corte da porção referente a duas bermas bem como na execução de solo grampeado. Dessa forma, previu-se a introdução de grampos passivos (não protendido) resistentes à tração no maciço de aço CA-50 de bitola 25mm com 9 metros de comprimento, que segundo a NBR 16920-2 formam um compósito com melhores características mecânicas. Além disso, considerou-se também proteção superficial de concreto projetado.

O procedimento é finalizado com a aplicação de um revestimento na face do maciço, composto por concreto projetado e tela de aço.

O concreto projetado consiste em uma mistura de cimento, areia, pedriscos, água e aditivos, sendo impulsionado por ar comprimido do equipamento de projeção até o local de aplicação através de um mangote. Essa aplicação pode ser realizada por via seca, onde a água é adicionada próximo ao bico de projeção, ou por via úmida, na qual o concreto é previamente preparado com água e então direcionado ao local de aplicação. Essa técnica é comumente utilizada para a proteção superficial contra a erosão em taludes de solo,

proporcionando uma camada protetora caracterizada por sua resistência, durabilidade e notável capacidade de resistir aos processos erosivos.

Além da contenção, propôs-se a construção de um aterro compactado sem controle com o material de estéril visando reconstruir duas bermas de jusante. Para conter a saia desse aterro, foi considerado um muro de peso de altura 4,0m.

Para o talude previu-se ainda a execução do sistema de drenagem.

O detalhamento dos cálculos para dimensionamento da solução de engenharia adotada para a estabilização do talude será apresentado nos tópicos a seguir.

4.1 Solo Grampeado

Para o dimensionamento do solo grampeado, selecionou-se o grampo de $\phi=25$ mm CA-50 e uma tela soldada Q-138 CA-60. Assim, o dimensionamento segundo a NBR 16920-2 é apresentado a seguir.

4.1.1 Resistência à tração do grampo (R_{td})

$$R_{td} = (A_{\text{útil}} * f_{yk}) / \gamma_m \quad (1)$$

em que:

R_{td} – Resistência a Tração de cálculo;

$A_{\text{útil}}$ – Área da seção transversal útil da armação;

f_{yk} – tensão de escoamento característica;

γ_m – coeficiente parcial de minoração da resistência característica = 1,15.

Para a determinação da área útil do aço, adotou-se a espessura de sacrifício das barras igual a 2mm. Então, temos:

$$R_{td} = [(25-4)^2 * \pi * 1/4] * 50 / 1,15 = 150,5 \text{ kN} \quad (2)$$

Assim, conservadoramente, estipulou-se $R_{td} = 150,0$ kN.

4.1.2 Ligação do grampo ao paramento (T_0)

A força de conexão do grampo com o paramento T_0 adotada igual a zero (0).

4.1.3 Resistência da interface solo-grampo (q_s)

Estipulou-se valor de q_s mínimo por meio de uma estimativa semiempírica, dentre várias estabelecidas na literatura. Assim, a equação adotada foi $q_s = 67 + 60 \ln(N_{SPT})$ proposta por Ortigão e Palmeira (1992). Como a média do N_{SPT} das camadas de instalação dos grampos é de 20 golpes, temos:

$$q_s = 67 + 60 \ln(20) = 246 \text{ kPa.} \quad (3)$$

Em atenção à recomendação da NBR 6122, o fator de segurança a ser utilizado para determinação da carga admissível é igual a 2,0 considerando que a resistência foi calculada por um método semiempírico, portanto:

$$q_{s_adm} = 246 / 2 = 123 \text{ kPa.} \quad (4)$$

Sendo q_s definida como a relação entre carga e área lateral do furo e, a perfuração no solo considerada igual a 100 mm de diâmetro, a área lateral calculada é de:

$$\text{Área lateral} = \pi * \phi_{\text{furo}} * l \quad (5)$$

sendo l o comprimento do chumbador.

Então, a carga por metro de chumbador resulta ser:

$$Q_{s_adm} = 123 \text{ kPa} * \pi * 100 \text{ mm} = 38 \text{ kN/m.} \quad (6)$$

Continuando com a abordagem conservadora, adotou-se o valor de $Q_{s_adm} = 30 \text{ kN/m}$ como o valor mínimo a ser considerado para o dimensionamento do projeto. É importante ressaltar que o ajuste do dimensionamento é realizado em obra por meio do ensaio de arrancamento.

4.2 Concreto Projetado

Foi adotada a solução em concreto projetado com a finalidade de proteger o talude exposto da possível erosão provocada pela ação das águas pluviais. Sendo assim, o paramento de concreto projetado não terá função estrutural e somente função de proteção superficial de taludes, logo um dimensionamento estrutural não se fez necessário.

O concreto projetado deve ter 15 cm de espessura, em que o concreto a ser utilizado deve apresentar resistência de pelo menos 20 MPa. Os drenos do tipo barbacã devem ser intercalados com grampos (CA-50 12,5mm) espaçados de 2,0m entre si ao longo do talude. O concreto projetado deverá ser armado com tela eletrossoldadas do tipo CA 60, tipo Q-188A ou similar. Como adotou-se armadura mínima, $\omega_{\text{mín}} = 0,035 = \rho_{\text{mín}} * f_{yd}/f_{cd}$, considerando aço CA-60 e um concreto com f_{ck} de 20 Mpa, $\rho_{\text{mín}} = 0,12\%$, para uma espessura de 15 cm de concreto temos uma área mínima de $0,84\text{cm}^2/\text{m}$.

4.3 Muro de Peso

Foi adotada a solução em muro de peso para conter o aterro de estéril executado para reconstruir a primeira e a segunda bermas danificadas com a erosão do talude do britador. A Figura 3 indica a seção tipo do muro de peso.

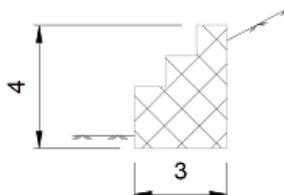


Figura 3. Seção Tipo do muro de peso.

Para a determinação dos empuxos atuantes foi aplicada a teoria clássica de Rankine para o caso de aterro inclinado, que considera que os movimentos do muro são suficientes para mobilizar os estados de tensão ativo ou passivo. O dimensionamento foi realizado através de planilha de cálculo, apresentado na Figura 4.

Dados	Sobrecarga	Parâmetros aterro	Peso específico
b = 3,00 m	q = 0,0 kPa	$\phi = 28$	$\gamma_{face} = 16$ kN/m ³
h _{sap} = 0,00 m		c = 8 kPa	$\gamma_{sat\ aterro} = 17$ kN/m ³
h _{terras} = 3,90 m	Parâmetros fundação	ka = 0,41	$\gamma_{sub\ aterro} = 7$ kN/m ³
h _{w,1} = 0,00 m	$\phi = 28$ °	kp = 2,77	$\gamma_{\acute{a}gua} = 10$ kN/m ³
h _{w,2} = 0,00 m	c = 5 kPa		
Lr (B) = 3,00 m	$\gamma'_{fundação} = 17$ kN/m ³	$\beta = 28$	
h = 3,90 m		$\epsilon = 1,570796$	
		$\theta_A = 45,7854$	

Peso Próprio		Deslizamento		Tensão		
Peso	Ltomb	Fv =	204,37 kN	N =	204,37 KN	
Face =	187,20	1,50	Fh,instab =	53,56 kN	M =	263,03 kNm
Peso de terras		Fh,estab =	105,76 kN	l =	1,29 m	
Peso	Ltomb	FS =	1,97	e =	0,35 m	
p =	17,17	1,50		B' =	2,30 m	
Empuxo ativo		Tombamento		$\sigma_{mín} =$	20,43 kPa	
Ea	Ltomb	Mres =	306,55 kNm	$\sigma_{máx} =$	86,48 kPa	
Ea =	33,48	1,30	Msol =	43,52 kNm	Capaci carga (Vesic):	
			FS =	7,04	q ult =	281,13 kPa
					q adm =	140,56 kPa
					Resultante	
					R =	210,93
					a =	75,67

Figura 4. Dimensionamento do muro de peso.

5 RESULTADOS E ANÁLISES

Para a verificação da estabilidade global das intervenções, foi utilizado o software Slide 2.0® desenvolvido pela RocScience. Foi adotado o critério de ruptura de Mohr-Coulomb com a abordagem do equilíbrio limite através dos métodos rigorosos GLE / Morgenstern-Price e Spencer. O modelo usado foi definido com base no mapeamento geológico, levantamento topográfico realizado e nos resultados das sondagens executadas no local de forma a simular a solução proposta.

As simulações foram conduzidas para situações hipotéticas de ruptura do talude de jusante do platô do britador, empregando-se o recurso de “otimização de superfícies” através do método de busca Cuckoo Search. Com a ruptura do talude do tipo não-circular otimizada, procurou-se a superfície cujo fator de segurança associado fosse o mais desfavorável; os materiais adotados e os presentes na estrutura foram considerados isotrópicos e homogêneos. Adotou-se para o caminhão transportador de minério um carregamento uniforme ao longo de 7 metros com 160 kN/m². A Figura 5 apresenta a localização da seção de análise, o perfil geológico-geotécnico da seção C-C' e o resultado da análise numérica. Conforme pode-se observar, a solução proposta atingiu fator de segurança de 1,547, atendendo aos requisitos estabelecidos. A Figura 5.A apresenta também um esboço da solução de engenharia proposta.

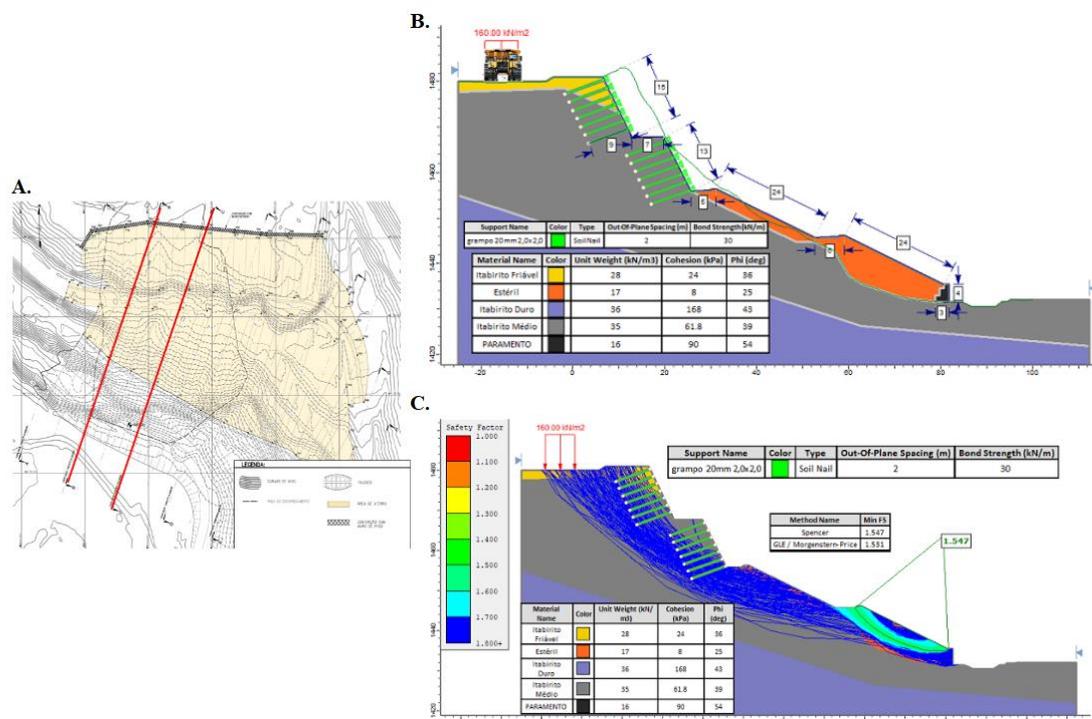


Figura 5. Localização e avaliação numérica da seção C-C', utilizada como referência.

6 CONCLUSÃO

Para garantir-se a estabilidade dos taludes e assim, assegurar a segurança humana, operacional e econômica, considerando-se todos os critérios e premissas estabelecidos, fez-se necessária a adoção de uma solução de engenharia mista. Dessa forma, o projeto de recuperação dos taludes contemplou retaludamento de crista, execução de solo grampeado e construção de aterro sem controle de compactação associado a um muro de peso em seu pé para conter a saia do aterro, limitada pelo sump a jusante. Isto posto, a configuração proposta atendeu a critérios de estabilidade, bem como a reconstituição de bermas essenciais para a manutenção dos taludes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Fonseca, L. (2014). *Avaliação de métodos de perfilagem geofísica na pesquisa de minério de ferro – Estudo de Caso: Definição de contatos litológicos na Mina de Capanema, MG*. Dissertação de Mestrado, Núcleo de Geotecnia, Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 108p.
- Franco, A. S. P. (2003). *Geometria e evolução tectônica do sinclinal Ouro Fino. Quadrilátero Ferrífero, MG*. Dissertação de Mestrado, Departamento de Geologia, Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 102 p.
- Ortigão, J. A. R., & Palmeira, E. M. (1992). Solo grampeado: técnica para estabilização de encostas e escavações. In Conferência brasileira sobre estabilidade de encostas (Vol. 1, pp. 57-74).
- Read, J., & Stacey, P. (2009). *Guidelines for open pit slope design*. CSIRO Publishing.
- Reis, R. C. (2010). *Estudo de estabilidade de taludes da mina de Tapira – MG*. Dissertação de Mestrado, Núcleo de Geotecnia, Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 95p.
- Vaz de Melo, M. T. & Seabra JR, A. A. G. (2000). *Geologia Econômica do Jazimento de Minério de Ferro da Mina de São Vicente, Itabirito, MG*. Minas da Serra Geral S/A. Relatório Interno. 69p.